

Terreni collassabili e processi di instabilità nella Valle dei Templi

Nicola Nocilla,* Margherita Zimbardo,* Laura Ercoli,* Alessandra Nocilla,** Elisa Ponzoni**

Sommario

Il complesso sacrale ellenistico della Valle dei Templi di Agrigento, Patrimonio UNESCO dell'Umanità, si snoda lungo la cresta di un banco di calcarenite, poggiante su un livello di sabbie. I costoni, in corrispondenza delle pareti calcarenitiche, risultano frequentemente in condizioni di equilibrio limite anche in prossimità delle principali strutture archeologiche, fra cui il Tempio di Giunone, il Tempio della Concordia, e il Tempio di Vulcano, le aree dei Donari e del Santuario Rupestre dedicato a Demetra, e la Necropoli paleocristiana. Tali strutture sono minacciate da fenomeni di instabilità e, in taluni casi, dall'arretramento del versante sino ad ora attribuito alla mesostruttura e a fenomeni di erosione selettiva e scalzamento al piede. Recenti studi hanno individuato per le sabbie parzialmente sature, sovrastate dalle calcareniti, il tipico comportamento dei terreni collassabili caratterizzati da struttura aperta e metastabile, nei quali un incremento del contenuto d'acqua può innescare notevoli variazioni volumetriche. Sulla base di rilievi in sito, di prove di laboratorio e di analisi numeriche agli Elementi Finiti è stato possibile ipotizzare il ruolo attivo delle sabbie nei fenomeni di dissesto consentendo una nuova lettura e interpretazione dei fenomeni di instabilità.

1. Introduzione

La Collina di Agrigento su cui sorgeva l'acropoli dell'antica Akragas, la Rupe Atenea e la Valle dei Templi (Fig. 1), inserita dall'UNESCO nel 1997 nella lista dei beni Patrimonio dell'Umanità, ospitano uno dei più fulgidi esempi di arte e architettura della Magna Grecia per la sua vastità, circa 450 ettari, e per l'eccezionale stato di conservazione del suo complesso urbano (VII-III sec. a.C.) e sacrale (VII sec. a.C.- V sec. a.C.) che, per la maggior parte, è stato edificato su costoni calcarenitici. Nel tempo si sono succeduti numerosi eventi franosi che hanno di volta in volta interessato diverse zone di rilevanza storico-archeologica. Già alla fine del 1800 qualche preoccupazione era sorta per la stabilità del costone sotto il Tempio di Giunone [CAVALLARI, 1883]. I processi di instabilità manifestatisi sempre più numerosi nel secolo successivo sono stati oggetto di numerosi studi [ERCOLI, 1985; MUSSO e ERCOLI, 1988; COTECCHIA *et al.*, 1995; COTECCHIA, 1996] nei quali l'arretramento dei costoni è stato addebitato a fenomeni franosi, a processi di erosione al piede, alla sistematica separazione, distacco e crollo di blocchi dalle pareti calcarenitiche. I dissesti minacciano le principali strutture archeologiche fra cui il Tempio di Giunone, il Tempio della Concordia ed il Tempio di Vulcano, le aree dei Donari e del Santuario rupestre dedicato a Demetra,

e la Necropoli paleocristiana con il suo importante complesso catacombale delle Grotte di Fragapane. Le zone in cui si sono prevalentemente manifestati i dissesti sono illustrate in figura 2. Recenti studi [NOCILLA *et al.*, 2013; ERCOLI *et al.*, 2014] hanno proposto una nuova chiave di interpretazione per tali fenomeni di instabilità, evidenziando il ruolo del banco di sabbie parzialmente sature e con struttura metastabile (Fig. 3). In questa nota viene presentata una lettura integrata dei risultati di alcuni monitoraggi del sito (rilievo topografico e laser scanner) e delle analisi dei dissesti, ipotizzando come causa d'innescio il comportamento meccanico delle sabbie. Tale lettura dovrebbe consentire l'individuazione di strategie d'indagine idonee a prevenire la regressione dei costoni della Valle, permettendo la salvaguardia di un bene dall'inestimabile valore storico, artistico e culturale.

2. Il contesto geologico e archeologico-urbanistico

L'assetto geologico e idrogeologico hanno profondamente influenzato la struttura urbanistica dell'insediamento greco, romano ed arabo [CROUCH, 2004]. Il centro storico di Agrigento identificabile con l'acropoli dell'antica Akragas (300-350 m s.l.m.) e il grandioso complesso sacrale della Valle dei Templi (120 - 170 m s.l.m.) sorgono sui lembi opposti di una blanda sinclinale asimmetrica formata dalla sovrapposizione di quattro banchi di calcarenite [RUGGIERI, 1961], tra i quali sono intercalati livelli di ar-

* Università di Brescia

** Università di Palermo



Fig. 1 – Valle dei Templi.

Fig. 1 – Valle dei Templi.

gille e sabbie, parasequenze [DILIBERTO, 1998], sedimentati in una fase regressiva nel corso del Plio-Pleistocene (Fig. 4). L'ala settentrionale della sinclinale immerge verso Sud, l'ala meridionale verso Nord, l'asse della sinclinale immerge verso est-sud-est. Alla base della cresta del banco più antico e più inclinato (prima parasequenza), a Est dell'Acropoli, si trovano le rovine del Santuario rupestre dedicato a Demetra. In corrispondenza del nucleo pianeggiante della sinclinale, occupato da affioramenti argilloso-sabbiosi e dal banco calcarenitico della quarta parasequenza, fu edificato il quartiere ellenistico romano, impiantato nel IV-II sec. a.C. e occupato fino al V sec d.C. Sulla cresta meridionale del banco identificato come appartenente alla terza parasequenza sorgono, lungo la strada sacra, i templi e gli arcosoli della necropoli tardoantica e altomedievale, e nel sottosuolo si estende il complesso catacombale delle Grotte Fraganane (IV sec. d.C.), da decenni chiuse al pubblico per problemi di sicurezza.

3. Mesostruttura e fenomeni di instabilità

Diversi studi hanno correlato il comportamento meccanico della formazione calcarenitico-sabbiosa-argillosa di Agrigento e i processi morfogenetici dei versanti, caratterizzati da una sequenza di terreni a bassa resistenza e di rocce tenere, all'orientazione delle discontinuità presenti sia nell'argilla che nella calcarenite [CROCE *et al.*, 1980; ERCOLI, 1985]. La presenza di un sistema di discontinuità nell'ammasso roccioso viene considerata come una diretta conseguenza del sollevamento differenziale che si è verificato nel corso della più recente fase neotettonica [DILIBERTO, 1998], a partire dal Pliocene. Analisi più recenti [NOCILLA *et al.*, 2013; ERCOLI *et al.*, 2014] hanno evidenziato il ruolo dello strato di sabbia parzialmente satura sottostante le calcareniti. Accertato il comportamento metastabile di tali sabbie con prove di laboratorio, il manifestarsi di processi deformativi del banco calcarenitico è stato attribuito a collassi

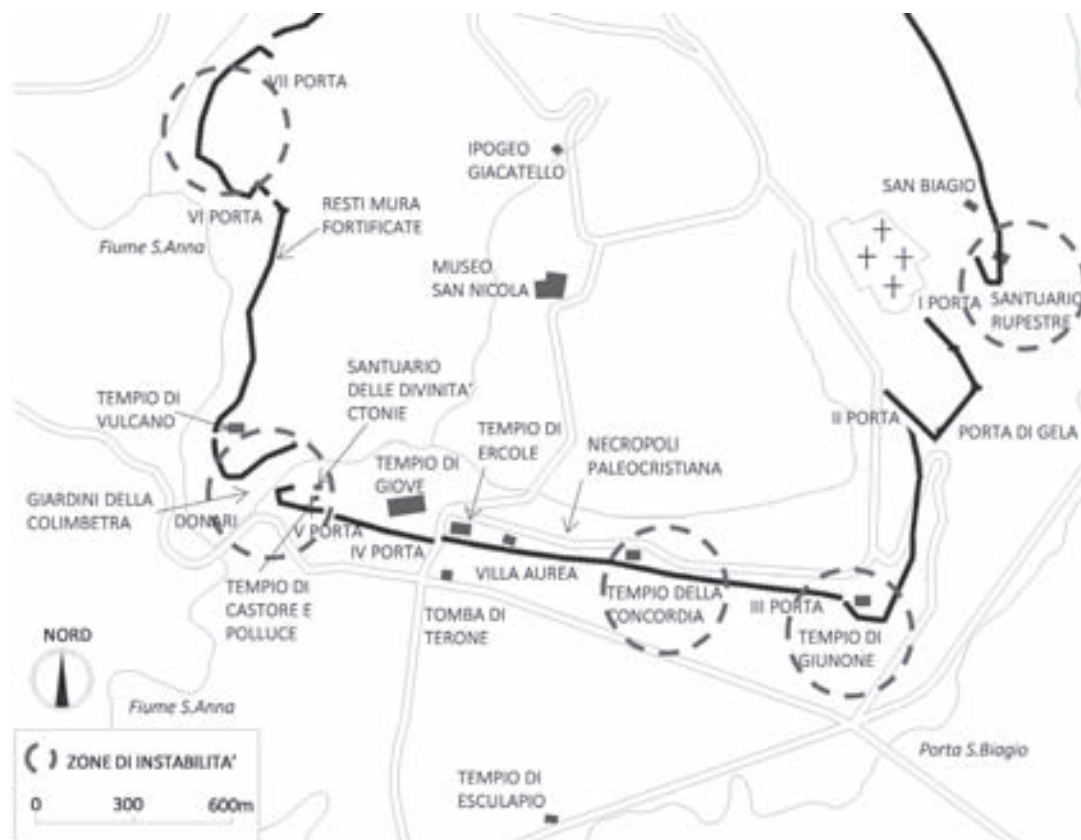


Fig. 2 – Mappa della Valle dei Templi di Agrigento e delle zone di maggiore instabilità.

Fig. 2 – Map of Valle dei Templi in Agrigento with localisation of the instability areas.

si conseguenti a circoscritti processi di saturazione in corrispondenza di preesistenti discontinuità. Ne deriva una sorta di processo a catena con collassi locali, incremento progressivo delle aperture delle discontinuità e una sostanziale modifica delle caratteristiche di permeabilità dell'ammasso roccioso. Le acque meteoriche sarebbero quindi in condizioni di raggiungere immediatamente e senza alcun ostacolo le sabbie sottostanti innescando ulteriori e progressivi collassi locali. Come conseguenza si produrrebbero le condizioni di ribaltamento dei blocchi calcarenitici con l'effetto di un progressivo arretramento della parete del costone. Questa ipotesi sull'evoluzione morfologica è stata avanzata sulla base dello studio dei dissesti che si sono verificati ai due estremi, ovest ed est, del costone della Valle dei Templi. Nella zona occidentale, compresa fra il Tempio di Castore e Polluce e di Giove e il Tempio di Vulcano, contiguo ai Giardini della Colimbeta, si è manifestato un progressivo ampliamento di alcune fratture sub-verticali (Fig. 5), capaci di delimitare blocchi di grandi dimensioni (all'incirca di 200 m^3) e si è assistito alla comparsa di alcune fratture di neoformazione sulla spianata sommitale del promontorio [ERCOLI *et al.*, 2014]. Nella zona ad est, le fondazioni del Tempio di Giunone si trovano ormai a pochi metri dal ciglio (Fig. 6) e, in ampi tratti della strada sacra



Fig. 3 – Strato di sabbia sottostante il banco di calcarenite.

Fig. 3 – Sandy layer under the calcarenite bench.

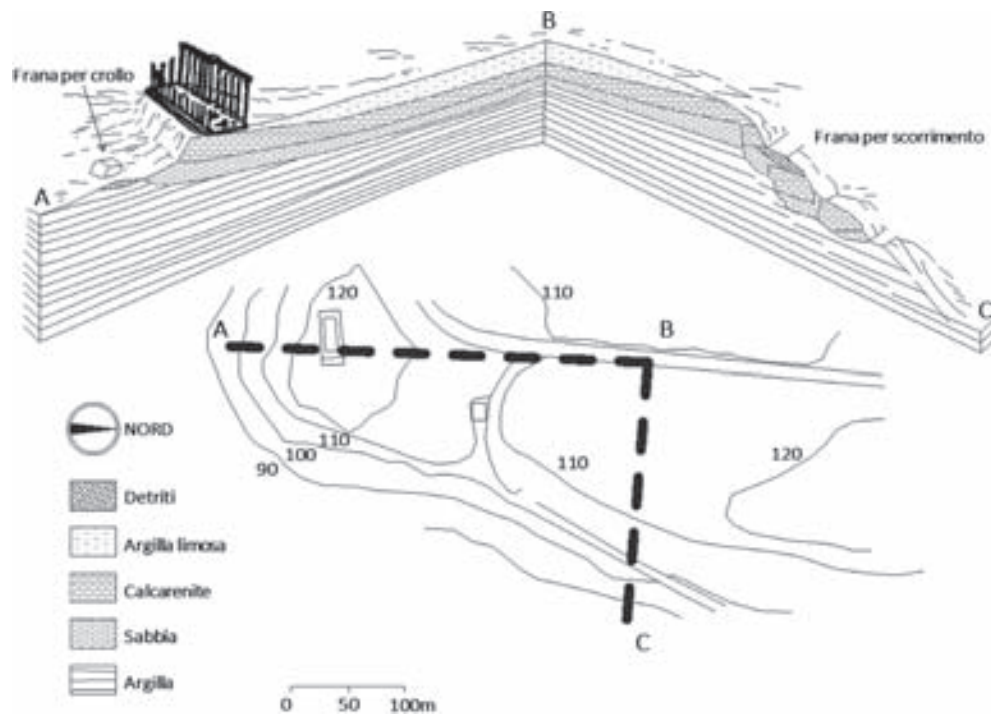


Fig. 4 – Assetto geologico e sezione stratigrafica, Tempio di Giunone (basato su MUSSO e ERCOLI, 1988).

Fig. 4 – *Geology and stratigraphical section, Tempio di Giunone.*

che si snoda dal Tempio della Concordia alla porta III e alla necropoli paleo-cristiana, alcune sepolture sono state già coinvolte nei crolli: sul versante a valle sono infatti sparsi grandi blocchi disarticolati su cui si notano le incisioni delle ruote dei carri, porzioni di tombe intagliate nella roccia e resti di murature difensive (Fig. 7). Nel 2010 imponenti blocchi di forma parallelepipedica si sono distaccati dal versante occidentale tra la Porta VI e la Porta VII delle mura difensive (Fig. 8). Anche sul versante orientale, i dissesti coinvolgono non solo i costoni, ma anche singole strutture antiche in elevazione; ad esempio il Santuario rupestre, la cui scoperta risale al 1938, ubicato



Fig. 5 – Discontinuità nel banco di calcarenite, Giardini della Colimbeta.

Fig. 5 – *Discontinuities in the calcarenite bench, Colimbeta's Gardens.*

all'interfaccia fra il banco calcarenitico e lo strato di sabbie, ha subito e continua a subire rotazioni e cedimenti di quasi tutte le strutture murarie con consistenti traslazioni e rotture dei conci, anche dell'ordine dei centimetri (Fig. 9).

4. Monitoraggio dei processi morfogenetici

L'evoluzione morfologica dei costoni tra il Tempio di Castore e Polluce e la Colimbeta e nella zona sottostante il Tempio di Giunone è stata assunta come rappresentativa della fenomenologia dei dissesti della Valle dei Templi ed è stata ed è oggetto di monitorag-



Fig. 6 – Tempio di Giunone [NOCILLA *et al.*, 2013].

Fig. 6 – *Tempio di Giunone.*



Fig. 7 – Resti delle mura su un blocco di calcarenite nel tratto di strada sacra.

Fig. 7 – Wall ruins over a calcarenite block along the ancient sacral road.

gi. Nella prima zona, contigua alla depressione della Colimbeta, il monitoraggio degli spostamenti è stato effettuato con i metodi di misura tradizionali della topografia procedendo in via preliminare alla delimitazione dei bordi dei blocchi già disconnessi. La misura degli spostamenti è stata effettuata mediante il rilievo della posizione plano-altimetrica di 35 picchet-



Fig. 8 – Recenti fenomeni di caduta massi tra la Porta VI e la Porta VII.

Fig. 8 – Recent rock fall phenomena between the VI and the VII door.



Fig. 9 – Santuario Rupestre: cedimenti e rotazioni delle strutture murarie.

Fig. 9 – Santuario Rupestre: settlements and rotations of the wall structures.

ti, appoggiandosi ai punti di rilevamento e di allineamento della rete geodetica georeferenziata di cui si è fornito l'Ente Parco [GRADO, 2006] (Fig. 10). Una valutazione di massima dello spostamento complessivo in direzione nord e in direzione ovest del ciglio del costone, ottenuta cumulando le singole aperture tra le varie discontinuità, indica valori dell'ordine di 1m per la parete settentrionale e dell'ordine di 1,5 m per

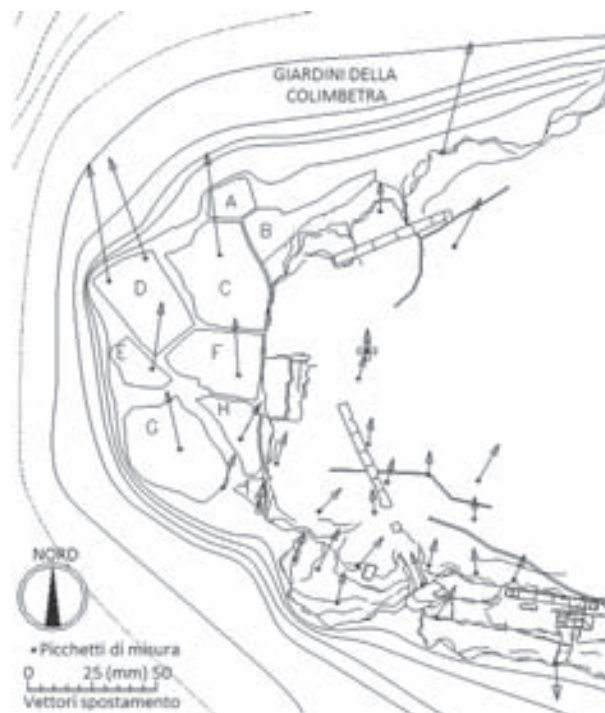


Fig. 10 – Vettori di spostamento dei blocchi distaccatisi dall'ammasso calcarenitico nella zona tra il Tempio di Castore e Polluce e i Giardini della Colimbeta.

Fig. 10 – Block displacement vectors of the in the area between Tempio di Castore e Polluce and the Colimbeta's Gardens.

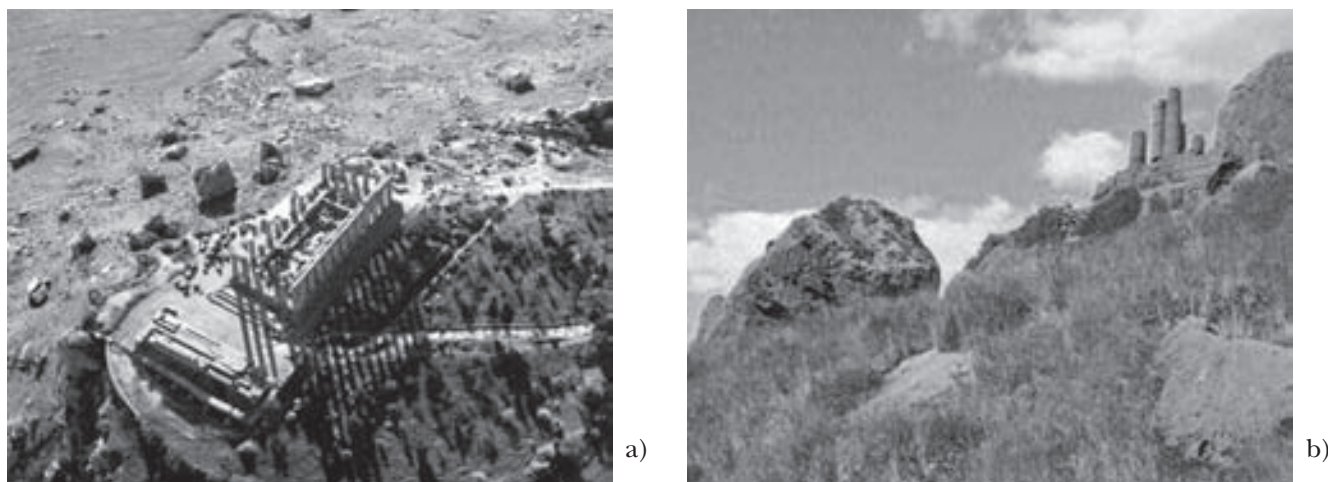


Fig. 11 – Zona di instabilità nei pressi del Tempio di Giunone: a) foto aerea; b) esempio di blocco di calcarenite e relativo detrito fine.

Fig. 11 – Instability area underlying the Tempio di Giunone: a) aerial photo; b) example of calcarenite's block and its fine materials.

quella orientale. La valutazione riguarda l'insieme degli spostamenti verificatisi nel tempo e quindi anche quelli antecedenti l'inizio delle misure topografiche di controllo. Nel periodo 2007-2010 sono stati misurati spostamenti dell'ordine minimo del cm. Sul fronte sud si sono recentemente evidenziati spostamenti dell'ordine dei millimetri, con la propagazione delle fratture di neoformazione estese per 14-16 m sul pianoro sommitale. La persistenza in profondità, accertata con aste metriche di 3 m infisse nelle fratture, è certamente superiore a tale valore; si ritiene che le discontinuità si estendano per l'intero banco modificandone le caratteristiche di permeabilità. Recenti osservazioni indicano un'ulteriore evoluzione di tale fenomenologia e la necessità di un monitoraggio continuo dell'area. Nella zona del Tempio di Giunone (Fig. 11a), i crolli hanno comportato un drastico arretramento del banco calcarenitico, sino a creare un'incipiente minaccia per le fondazioni del Tempio. Per la valutazione dei processi morfogenetici si è proceduto al rilievo dei blocchi sul versante e dei costoni con il laser scanner a tempo di volo Riegl VZ400, capace di una portata massima di 600 m, di una velocità di acquisizione fino a 125.000 punti al secondo e di una risoluzione massima di 5 mm alla distanza di 100 m. La scansione tridimensionale ha consentito di definire le sagome e i volumi dei blocchi distaccatisi dal costone, su un fronte di 100 m, dispersi a valle. La misura del volume si riferisce alla parte di blocco affiorante al di sopra della superficie topografica e quindi trascura l'eventuale parte interrata nel detrito fine accumulato attorno (Fig. 11b). I blocchi sul pendio, a varie distanze dal ciglio, hanno volumi ovviamente ridotti rispetto al volume iniziale, poiché il fenomeno del crollo è associato alla frammentazione ed alla produzione di materiale fine. Una stima del volume iniziale dei blocchi può essere effettuata utilizzando sia i risultati ottenuti per il Tufo Giallo Na-

poletano [NOCILLA *et al.*, 2009], che presenta caratteristiche meccaniche comparabili con quelle delle calcareniti, sia misure eseguite in sito in occasione del recente crollo tra la Porta VI e la Porta VII (Fig. 8). La progressiva riduzione del volume dei blocchi con la distanza (x) dalla nicchia di distacco viene espressa da un parametro α , che rappresenta l'entità del processo di frantumazione, processo tanto più intenso quanto maggiormente scadenti sono le caratteristiche del materiale. Ne deriva, per il singolo blocco, un volume finale (V) minore del volume iniziale (V_0) secondo la relazione:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot x} \quad (1)$$

In tale relazione empirica la distanza x va inserita in m. Il crollo verificatosi tra le porte VI e VII ha consentito di valutare un valore di α pari a 0.019. Il volume finale V_{tot} risultante dalla sommatoria dei volumi dei singoli blocchi, sottostimati a causa del parziale interramento, è risultato pari a 1200 m³. Valutato il volume iniziale di ciascun blocco con la (1) si ottiene un volume iniziale complessivo V_0 ($V_0 = \sum V_{0i}$) pari a 2300 m³. Poiché l'altezza media del costone è pari a circa 6 m, l'arretramento complessivo del fronte, rappresentato in figura 12, può essere stimato in circa 6-7 m. Tale arretramento ha coinvolto i resti delle mura della città estendendosi fino agli ipogei di età paleocristiana con una velocità media di circa 20 cm/secolo.

5. Classificazione e comportamento meccanico delle sabbie

In laboratorio sono state condotte prove finalizzate alla classificazione e alla determinazione del comportamento meccanico delle sabbie. La distribuzione granulometrica (Fig. 13) è tipica di una sab-

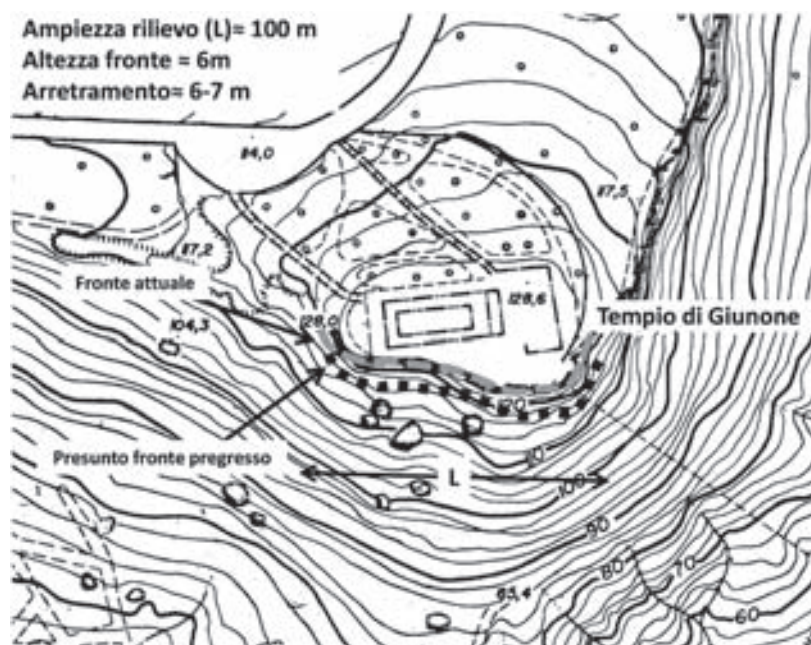


Fig 12 – Rappresentazione dell’arretramento del fronte del banco di calcarenite nella zona del Tempio di Giunone (basato su ERCOLI *et al.*, 2014).

Fig. 12 – Map of the cliff recession in the area of the Tempio di Giunone.

bia fine o mediamente fine, caratterizzata da elevata uniformità ($C = 5$). La frazione argillosa è inferiore al 10% e il contenuto di limo inferiore al 20%. La densità relativa G_s è pari a 2,702, il peso dell’unità di volume al contenuto d’acqua naturale γ_0 pari a 14,6 kN/m^3 , il peso dell’unità di volume secco γ_{d0} pari a 14,09 kN/m^3 , la porosità n è pari al 46%. Il grado di saturazione in sito è compreso tra il 6% e il 12%. Lo Slake Durability Test [FRANKLIN *et al.*, 1979] con cui si misura la resistenza alla disgregazione di campioni di roccia, sottoposti a due cicli di imbibizione e di essiccamento, fornisce un valore estremamente ridotto dell’indice di durabilità ($Id_2 < 60\%$), rapporto tra il peso del materiale con diametro superiore a 4 mm e il peso iniziale, tipico di terreni non cemen-

tati (Fig. 14). La consistenza del terreno e la sua suscettibilità ad essere modellato indicano che la resistenza è dovuta ad elevate tensioni superficiali negative, derivanti dai ridotti valori di contenuto d’acqua e quindi all’insorgere di tensioni di suzione. I clasti, di composizione piuttosto uniforme, sono costituiti prevalentemente da quarzo, frammenti di gusci di conchiglie, foraminiferi e entrochi, micrite algale e microspareite (Fig. 15a). Le particelle raggiungono raramente dimensioni maggiori ai 500 μm , sebbene siano presenti frammenti fossili di dimensioni comunque non superiori a 900 μm . Nell’immagine al microscopio elettronico di figura 15b, è possibile notare la presenza di frazione limosa distribuita sui singoli grani interposta fra di essi. La presenza di

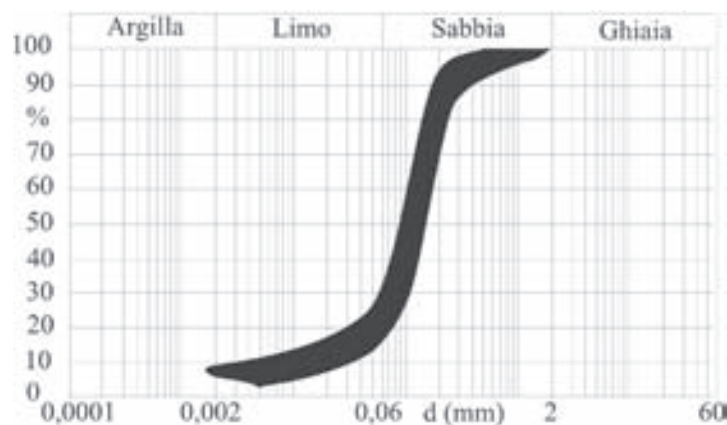


Fig. 13 – Fuso granulometrico dei campioni di sabbia (basata su ERCOLI *et al.*, 2014).

Fig. 13 – Sand particle size distribution.

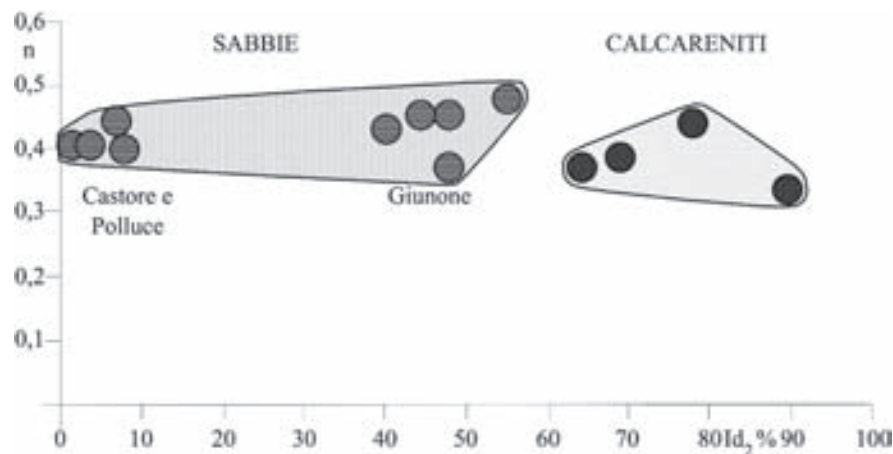


Fig. 14 – Indice di durabilità Id_2 e porosità n per le sabbie e le calcareniti di Agrigento.

Fig. 14 – Durability index Id_2 and porosity n in the sand and in the calcarenite of Agrigento.

particelle di tale natura è considerata di fondamentale importanza nella meccanica dei terreni parzialmente saturi [COLLINS e MC GOWN, 1974; ALONSO *et al.*, 1987] perché, insieme alla tipologia dei contatti fra i grani e della geometria dei pori, influenza il modo in cui l'acqua avvolge le particelle solide [KEZDI, 1974], nonché la continuità, distribuzione e interazione tra le fasi solida, liquida e gassosa. Di conseguenza, la pellicola sembrerebbe avere un'influenza diretta sulla presenza e sull'intensità delle forze di suzione che derivano dalla presenza di menischi. Tale sabbia mostra le caratteristiche tipiche dei terreni collassabili in accordo con quanto definito da ROGERS [1995], LIN [1995], BELL e DE BRUYN [1997] e HOUSTON *et al.* [2001; 2003]. La fase aeriforme continua e la fase liquida discontinua sono una tipica condizione dei depositi recenti, sedimentati in aree aride e caratterizzati da gradi di saturazione estremamente ridotti. Le sabbie di Agrigento sono caratterizzate da una struttura metastabile, alto indice dei vuoti, basso valore del peso dell'unità di volume secco e da una risorsa di resistenza a taglio generata dalla presenza di legami di diversa natura tra le particelle stesse. La resistenza di tali legami può subire una repentina riduzione in seguito ad incrementi del contenuto d'acqua e/o di tensioni agenti, permettendo alle particelle di scivolare le une rispetto alle altre, generando così un meccanismo di collasso. Per i terreni collassabili, in generale, numerosi autori [BARDEN *et al.*, 1973; CLEMENCE e FINBARR, 1981; POPESCU, 1986; ROGERS, 1995] hanno identificato tre differenti tipologie di costituenti responsabili della coesione apparente come mostrato in figura 16: capillarità o forze di suzione (Fig. 16a); particelle di argilla o limo che impediscono il diretto contatto tra i grani di dimensione maggiore (Fig. 16b,c,d); agenti cementanti, come carbonati o ossidi (Fig. 16e). In taluni casi, la coesione apparente può essere combinazione di 2 o più costituenti. In generale, il collasso

si verifica quando la tensione netta supera la resistenza allo snervamento di questi contatti. Nel caso del deposito di Agrigento, considerato che lo stato tensionale totale non ha subito modifica, il collasso si verifica in seguito all'incremento del grado di saturazione. Allo stato naturale, il grado di saturazione è estremamente basso e, come suggerito dalle precedenti ricerche, il materiale sembrerebbe non cementato. Sebbene allo stato attuale, la natura dei contatti debba essere ancora chiarita, ERCOLI *et al.* [2014] hanno avanzato l'ipotesi che la coesione apparente che caratterizza i legami tra le particelle di sabbia sia una combinazione del primo tipo (suzione), figura 16a, e del secondo (contatto diretto impedito dalla presenza di particelle o aggregati di limo e conseguente sviluppo di elevata suzione), figura 16b. Studi sul comportamento di una sabbia carbonatica [ATKINSON e NOCILLA, 2003] hanno mostrato come elevati valori di suzione possono insorgere in presenza di terreni incoerenti con valori estremamente ridotti del contenuto d'acqua. Nella tabella I sono riportati i risultati di prove di laboratorio condotte su provini indisturbati, prelevati nello strato sabbioso sottostante il Tempio di Vulcano e il Tempio di Giunone, e sottoposti a compressione con espansione laterale impedita, sia in anello edometrico che in scatola di taglio. Le prove sono state condotte con una procedura non standard, sottoponendo inizialmente il campione a contenuto naturale d'acqua ad una tensione efficace normale σ'_n compresa tra 25 e 7300 kN/m². Mantenendo il carico normale costante il campione è stato inondato con acqua distillata solo dopo l'esaurimento dei processi deformativi. È stato osservato lo sviluppo di due distinti cedimenti [NOCILLA *et al.*, 2013]. Il primo cedimento si manifesta durante la fase di compressione in condizioni di parziale saturazione; il secondo in seguito all'aumento del contenuto d'acqua conseguente all'allagamento della cella. I due percorsi deformativi risultano sepa-

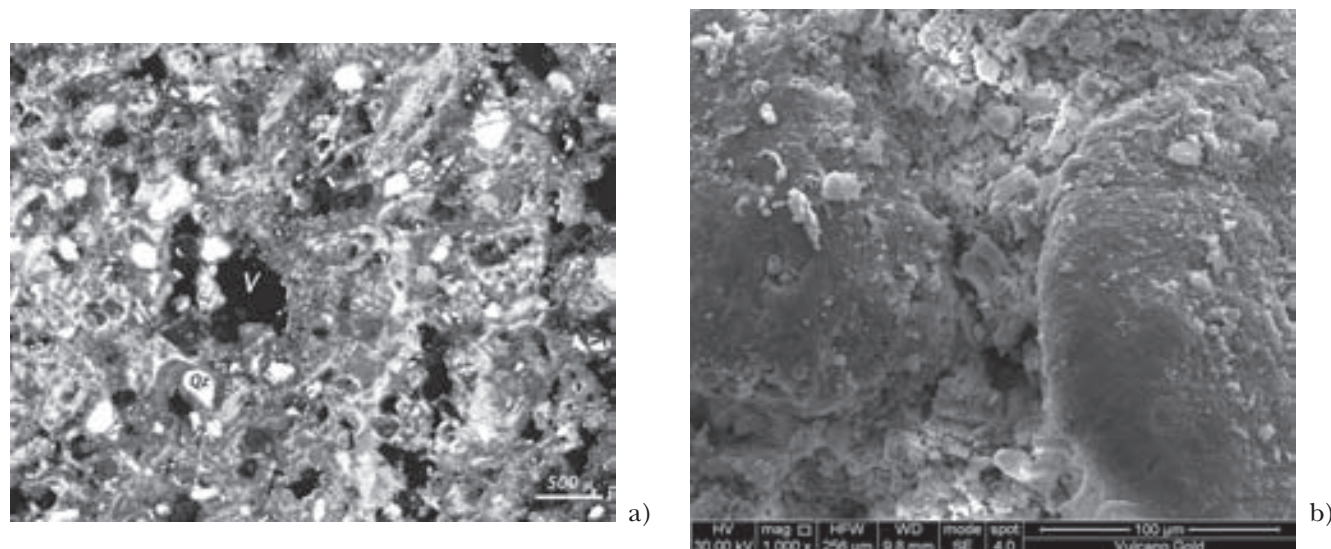


Fig. 15 – a) Sezione sottile (microscopio ottico a luce trasmessa); b) fotografia SEM: presenza di aggregati di particelle limose.
 Fig. 15 – a) Thin section (cross polarized light); b) SEM photograph: presence of silty particle aggregates.

rati dal collasso repentino della struttura tanto più importante quanto più elevato è il valore di tensione normale efficace al momento dell'inondazione, con una variazione dell'indice dei vuoti pari anche al 23%. JENNINGS e KNIGHT [1975] hanno introdotto una classificazione della severità del collasso basata sul valore della deformazione verticale che subisce un elemento di terreno in seguito al collasso. Tale deformazione prende il nome di potenziale di collasso e viene definita nell'equazione

$$CP = \Delta H / H_0 = \Delta e / (1 + e_0) \cdot 100 \quad (2)$$

dove ΔH e Δe sono rispettivamente la variazione di altezza e di indice dei vuoti del campione in seguito all'allagamento della cella, mentre H_0 è l'altezza iniziale del provino ed e_0 è l'indice dei vuoti iniziale. Poiché il valore di CP dipende dalla tensione in cor-

rispondenza della quale viene allagata la cella, gli autori suggeriscono una procedura standard secondo la quale il campione viene allagato alla pressione di 200kPa, per la quale, secondo le indicazioni ASTM [ASTM D 5333-03] il potenziale di collasso prende il nome di indice di collasso I_c . In figura 17 si riportano, in funzione della tensione effettiva applicata al momento dell'allagamento della cella, i rapporti espressi in percentuale tra il cedimento ΔH in corrispondenza dell'allagamento e l'altezza iniziale del campione H_0 . I risultati ottenuti presso il laboratorio geotecnico del DICAM sono interpolabili con l'equazione (3):

$$CP = \Delta H / H_0 = 1.45 \cdot \exp(3.51 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma'_n) \quad (3)$$

Dall'equazione (3), in corrispondenza della tensione normale efficace $\sigma'_n = 200\text{kPa}$, si ottiene un va-

Tab. I – Proprietà dei campioni di sabbia analizzati [ERCOLI *et al.*, 2014].

Tab. I – Properties of the analysed sandy samples.

Campione	Tipologia di prova	γ_{sat} [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	n_0 -	σ'_n [MPa]	S_0 [%]	S_r [%]	CP [%]
VS1	Taglio diretto	14.166	13.854	0.476	0.025	6.7	59.0	1.00
VS2	Taglio diretto	14.713	14.354	0.456	0.050	7.9	54.0	1.08
VS3	Taglio diretto	14.974	13.377	0.446	0.075	9.4	60.0	1.34
VS4	Taglio diretto	14.942	14.676	0.447	0.100	6.1	56.0	1.35
VS5	Taglio diretto	14.836	14.535	0.451	0.150	6.8	58.0	1.22
VS6	Taglio diretto	14.635	14.217	0.459	0.200	9.3	57.0	2.37
VS7	Taglio diretto	13.965	13.619	0.483	0.300	8.5	71.0	2.17
VO8	Edometrica	14.792	14.248	0.451	7.264	12.3	-	13.13
VO9	Edometrica	-	14.128	0.456	3.277	-	-	9.45
VO10	Edometrica	14.381	13.945	0.463	1.506	9.6	-	2.51

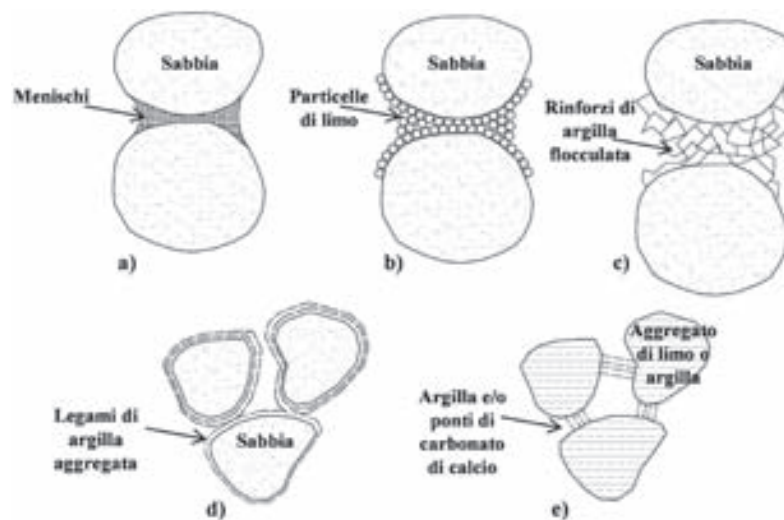


Fig. 16 – Tipici legami presenti in terreni collassabili: a) capillarità e forze di suzione; b-c-d) elementi di connessione quali limo e/o argilla tra i grani del terreno; e) agenti cementanti (basata su POPESCU, 1986).

Fig. 16 – Typical collapsible soil structures: a) capillary and matric suction forces; b-c-d) connectors such as fine silt and/or clay at coarser particle contact; e) cementing agents.

lore dell'indice di collasso I_c pari a 2,37. Secondo le classificazioni fornite da JENNINGS e KNIGHT [1975], tale valore è considerato di "problematica moderata" (*moderate trouble*). In corrispondenza del valore della tensione verticale efficace media nel banco di sabbia, pari a 170kPa, risulta un valore medio del potenziale di collasso CP pari a 1,54%. Ne deriverebbero ridotti cedimenti che combinati all'eterogeneità e alla localizzazione dei fenomeni di saturazione possono determinare cedimenti differenziali con l'insorgere di zone di plasticizzazione per trazione nel costone calcarenitico sovrastante e spostamenti orizzontali decrescenti con la profondità tali da innescare fenomeni di fratturazione, ribaltamento e crollo di blocchi che non sarebbero quindi più esclusivamente attribuibili ai processi di erosione come ipotizzato in passato.

6. Analisi numeriche

Analisi numeriche eseguite con il programma agli elementi finiti Plaxis 2D, in stato piano di deformazione, e considerando un criterio di rottura alla Mohr-Coulomb, forniscono sia nella zona del Tempio di Giunone sia in corrispondenza del Tempio di Castore e Polluce, risultati congruenti con le precedenti valutazioni, quando si impone, al fine di simulare il cedimento, una variazione di volume $\varepsilon_v\%$, pari al 5% nello strato di sabbia. Nelle analisi, invece di considerare in una variazione di volume pari al 2% corrispondente al valore medio di stato tensionale nelle sabbie, si è voluto verificare l'effetto di locali concentrazioni delle tensioni conseguenti a spostamenti o rotazioni rigide dei blocchi

calcarenitici sovrastanti. Nelle figure 18 vengono riportate le sezioni trasversali utilizzate per il calcolo, i parametri meccanici, le caratteristiche fisiche dei terreni e le sequenze stratigrafiche in entrambi i casi composte da uno strato di calcarenite sovrastante lo strato di sabbia e più in profondità uno strato di argilla che assume spessore anche superiore a 100 m. I valori dei parametri meccanici introdotti nel modello derivano dai risultati della sperimentazione sulle sabbie, ancora in corso di approfondimento presso il DICAM, e dai dati disponibili in letteratura [CROCE *et al.*, 1969; EVANGELISTA e PELLEGRINO, 1990]. In figura 19a sono rappresentati i punti di rottura e i punti di plasticizzazione in cor-

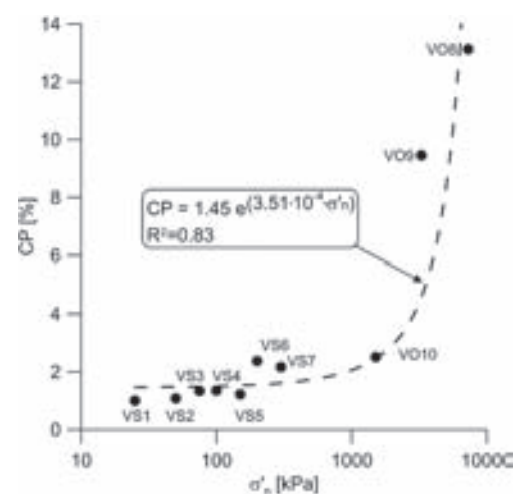


Fig. 17 – Percentuali di collasso CP in funzione dello sforzo normale efficace applicato [ERCOLI *et al.*, 2014].

Fig. 17 – Collapse percentages CP plotted against effective normal stress.

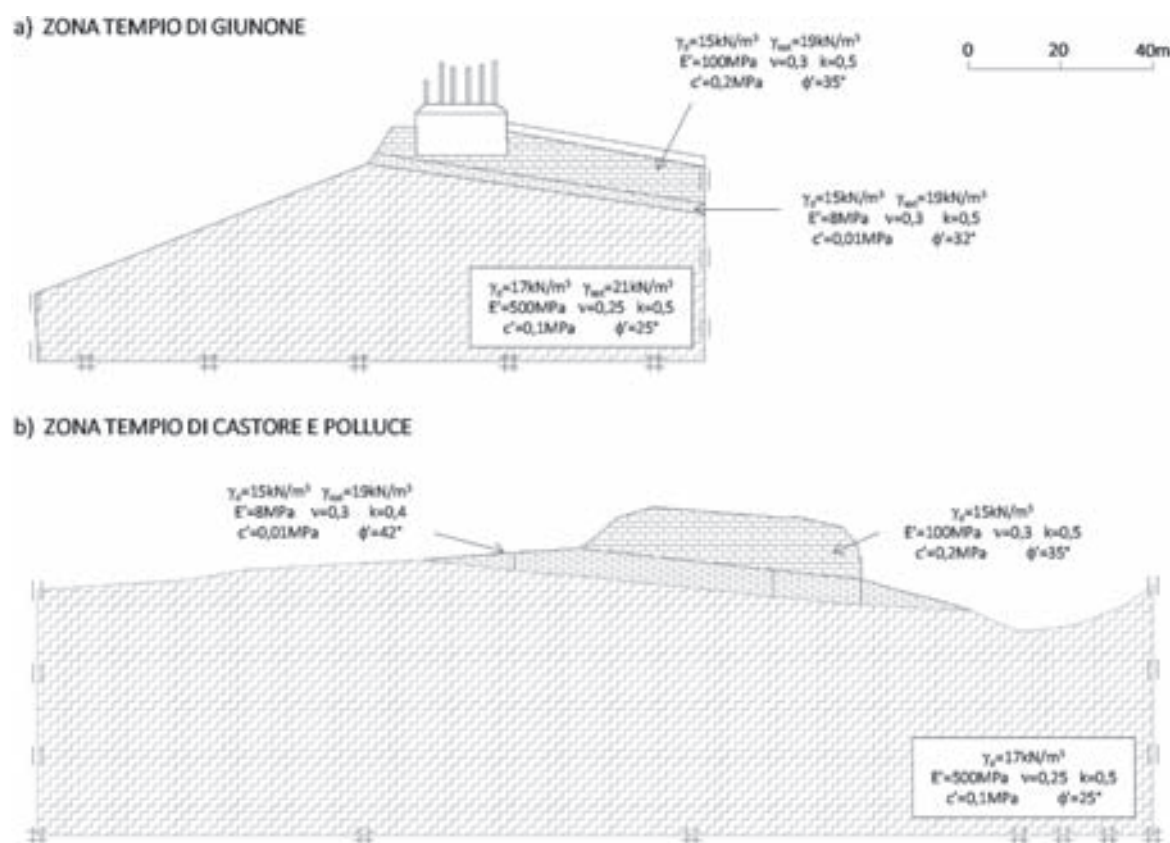


Fig. 18 – Modelli adottati per le analisi numeriche: a) Tempio di Giunone; b) area in corrispondenza del Tempio di Castore e Polluce.

Fig. 18 – Models adopted for the numerical analysis: a) Tempio di Giunone; b) Tempio di Castore e Polluce area.

rispondenza alla zona del tempio di Giunone. In figura 19b vengono presentati i valori degli spostamenti orizzontali che risultano significativi solo sul versante sud, pari a circa 3 cm. In corrispondenza del tempio di Castore e Polluce, analogamente vengono presentati i punti di rottura e i punti di plasticizzazione (Fig. 20a) e gli spostamenti orizzontali (Fig. 20b), i quali risultano minimi o trascurabili sul versante sud, mentre si registrano valori maggiori sul versante nord prospiciente i Giardini della Colimbeta dove possono raggiungere valori di 10cm. La differente entità degli spostamenti è correlata alla giacitura del contatto stratigrafico sabbia/argilla, nel primo caso disposta a reggipoggio e nel secondo, a franapoggio verso nord. In entrambe le zone, in prossimità del ciglio, si raggiungono valori prossimi all'unità del rapporto resistenza al taglio disponibile/resistenza al taglio mobilitata e si sviluppano sforzi di trazione di intensità tale da innescare la frattura sia del banco calcarenitico sovrastante le sabbie sia all'interfaccia fra i due terreni. Sebbene le modellazioni presentate si riferiscano a zone differenti, esse conducono al medesimo risultato e cioè che il distacco dei blocchi di calcarenite dalla parete e conseguentemente il loro crollo per ribaltamento può essere attribuito alle variazioni di

stato tensionale indotte dall'incremento del contenuto d'acqua nello strato sabbioso.

7. Discussione e considerazioni conclusive

Le ricerche in atto sono finalizzate a verificare se, nelle Sabbie di Agrigento, il limo costituisca una pellicola continua attorno ai singoli grani di sabbia, se la frazione fine formi ponti costituiti da microaggregati fra i grani, o ancora se, in generale, la presenza di limo sia talmente sporadica da non caratterizzare la natura dei legami. Inoltre è necessario escludere che il processo di collasso sia eventualmente ed esclusivamente da addebitare all'annullamento totale o parziale della suzione o se si debbano tenere in considerazione possibili meccanismi di dissoluzione di legami di cementazione in funzione della loro natura mineralogica. Le analisi numeriche fin qui condotte, non considerando la parziale saturazione, correlano il collasso dello strato di sabbia ai fenomeni di fratturazione, ribaltamento e crollo dei blocchi calcarenitici. Questi fenomeni non sembrerebbero più da imputarsi esclusivamente ai processi di erosione, come ipotizzato in passato da numerosi autori, ma sarebbero con-

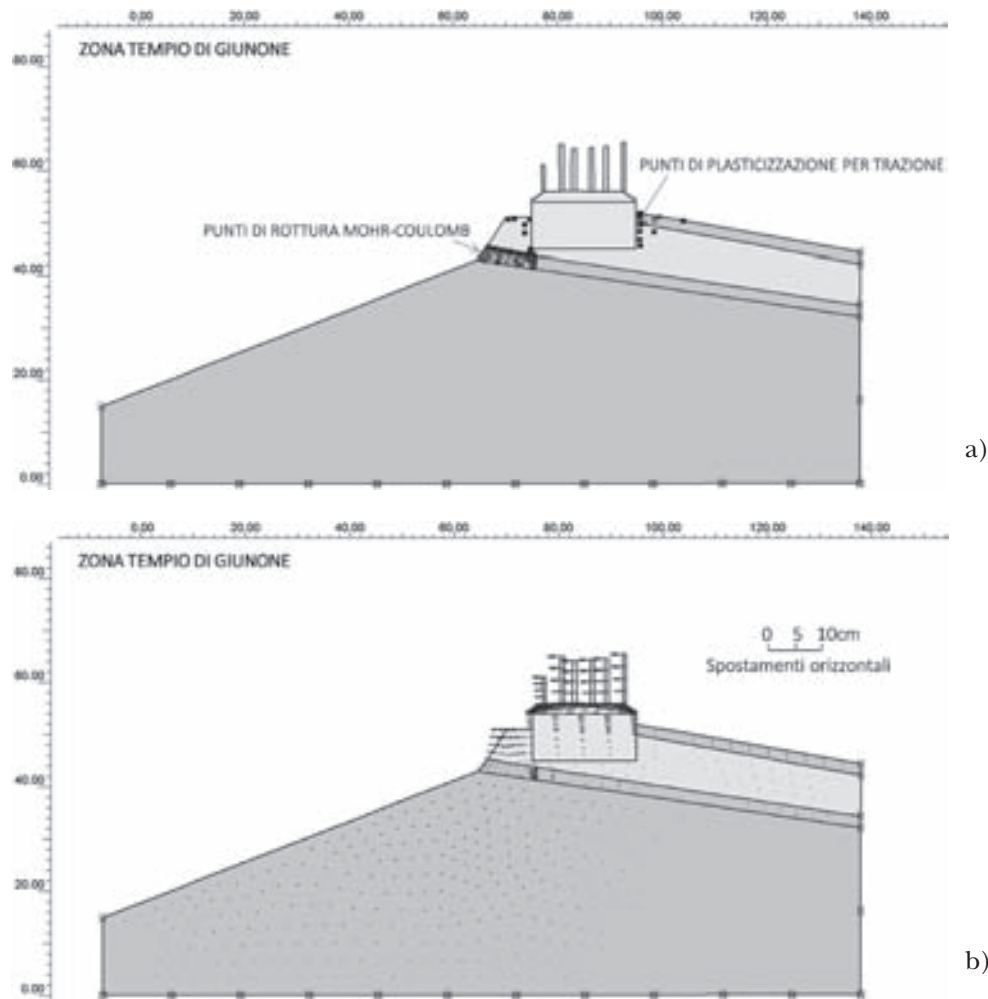


Fig. 19 – a) Punti di rottura alla Mohr-Coulomb e punti di plasticizzazione per trazione (Tempio di Giunone); b) Spostamenti orizzontali; valore massimo 2,9 cm.

Fig. 19– a) Mohr Coulomb failure and tensile plasticity points (Tempio di Giunone); b) Horizontal displacements; maximum value 2.9 cm.

seguenti alle variazioni di stato tensionale indotte dall'incremento del contenuto d'acqua nello strato sabbioso. In questa nuova interpretazione dell'evoluzione geomorfologica dei versanti e dell'arretramento del ciglio causati, in parte o totalmente, dal comportamento meccanico delle sabbie particolare attenzione deve essere dedicata alla formazione di nuove fessure e all'incremento delle aperture delle stesse. L'evoluzione del quadro fessurativo comporta una notevole variazione delle caratteristiche di permeabilità del banco calcarenitico, agevolando la rapida infiltrazione delle acque piovane verso le sabbie sottostanti e innescando di conseguenza progressivi collassi locali. La dinamica dell'evoluzione morfologica del versante interpretata alla luce di quanto sopra esposto dovrebbe essere monitorata mediante una programmazione delle indagini in situ con misure di suzione al variare del contenuto d'acqua e, ad una scala globale, attraverso un rilievo costante degli spostamenti, da attuare con tecniche di interferometria radar o con rilievi

in situ con laser scanner. Il quadro delineato nel presente lavoro evidenzia che, per quanto numerosi siano gli studi effettuati sul contesto geotecnico della Valle dei Templi, sono necessarie ulteriori analisi sperimentali e numeriche al fine di adottare un piano per la salvaguardia di un patrimonio storico culturale dall'incommensurabile valore. Lo studio dell'evoluzione di tale fenomeno e dei meccanismi di collasso finalizzati agli interventi di conservazione del monumento è attualmente in corso di sviluppo.

8. Ringraziamenti

La ricerca è stata supportata in parte da fondi MIURex60% (FFR2012-2013.R2FFRAD10+PONX). Un particolare ringraziamento va all'Ente parco della Valle dei Templi, che ha promosso e siglato il protocollo di accordo di collaborazione tecnico-scientifica tra il Parco archeologico e paesaggistico

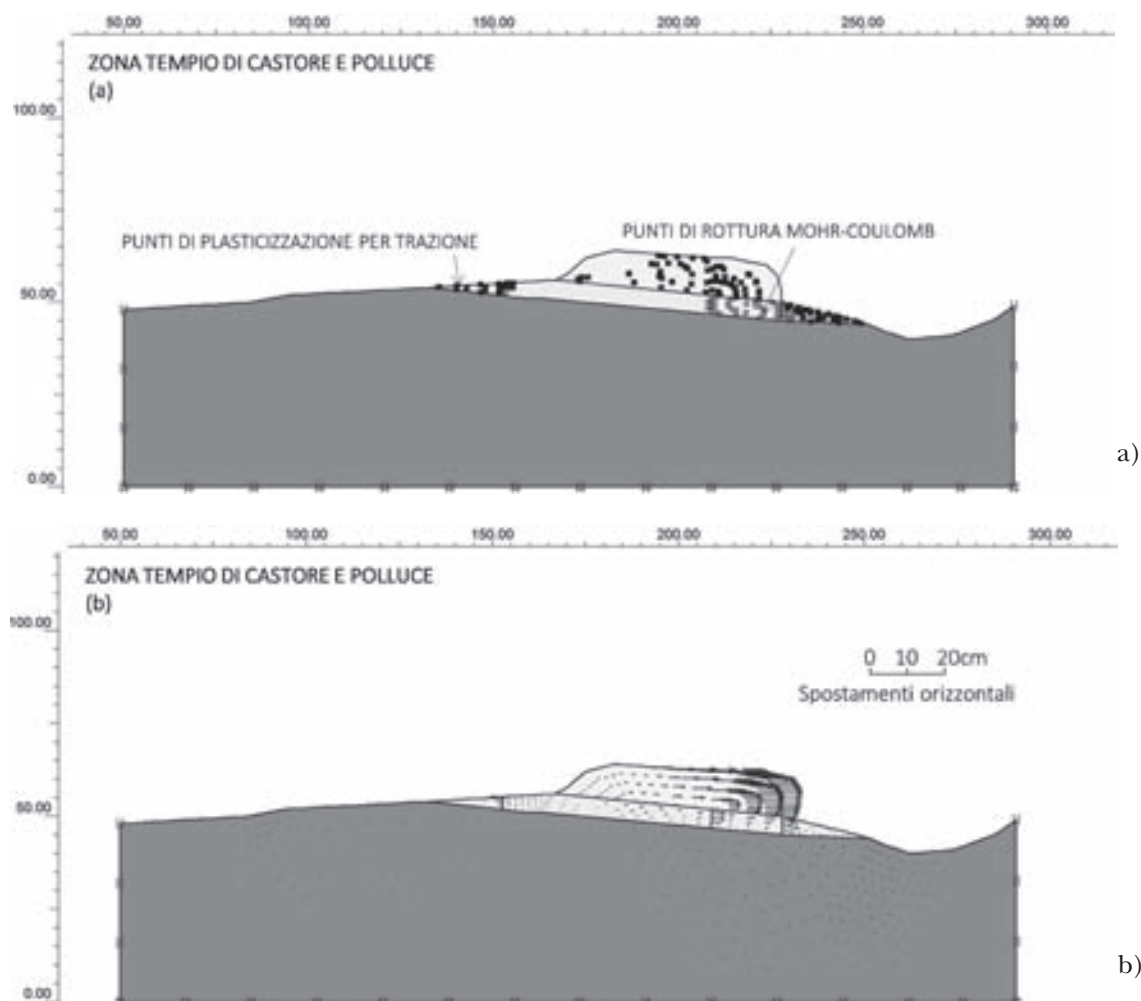


Fig. 20 – a) Punti di rottura alla Mohr-Coulomb e punti di plasticizzazione per trazione (Tempio di Castore e Polluce); b) Spostamenti orizzontali; valore massimo 10 cm.

Fig. 20 – a) Mohr Coulomb failure and tensile plasticity points (Tempio di Castore e Polluce); b) Horizontal displacements; maximum value 10 cm.

della Valle dei templi di Agrigento e il Dipartimento di Ingegneria civile, ambientale e aerospaziale e dei materiali dell'Università di Palermo.

Bibliografia

- ALONSO E.E., GENS A., HIGHT D.W. (1987) – *Special problem soils. General Report*. Proc 9th Eur. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Ireland, 3, pp. 1087-1146.
- ASTM D5333-03 (2003) – *Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential of Soils* (Withdrawn 2012). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ATKINSON J., NOCILLA A. (2003) – *Suction and strength in heavily compressed carbonate sand*. Géotechnique, 53, n. 9, pp. 831-832.
- BARDEN L., MCGOWN A., COLLINS K. (1973) – *The collapse mechanism in partly saturated soil*. Engineering Geology, 7, n. 1, pp. 49-60.

- BELL F.G., DE BRUYN I.A. (1997) – *Sensitive, expansive, dispersive and collapsible soils*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 56, pp. 19-38.
- CAVALLARI C. (1883) – *Rapporto dell'Ing. topografo Cristoforo Cavallari sui Danni avvenuti al muro di sostegno della strada di accesso al Tempio di Giunone Lacinia e visita alle antichità di Girgenti, in data 19 gennaio e 30 aprile*. Archivio centrale dello Stato, II Vers, II Serie, Busta 147, Fasc. 1713.
- CLEMENCE S.P., FINBARR A.O. (1981) – *Design considerations for collapsible soils*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107, pp. 305-317.
- COLLINS K., MCGOWN A. (1974) – *The form and function of microfabric features in a variety of natural soils*. Géotechnique, 24, n. 2, pp. 223-254.
- COTECCHIA V. (1996) – *Geotechnical degradation of the archaeological site of Agrigento*. Arrigo Croce Memorial Symposium, Balkema.
- COTECCHIA V., D'ECCELSIS G., POLEMIO M. (1995) – *La dinamica dei versanti della Valle dei Templi di Agrigento*.

- to. Geologia applicata e idrogeologia, Bari, vol. XX, Parte I.
- CROUCH D. P. (2004) – *Geology and settlements. Greco-roman patterns*. Oxford UP.
- CROCE A., DE MIRO E., FENELLI G.B., JAPPPELLI R., LIGUORI, V., MORANDI R., NOCILLA N., PACE E., PELLEGRINO A., ROSSI DORIA P. (1980) – *La Città di Agrigento e la Valle dei Templi*. In: “Questioni di stabilità del territorio e di conservazione dei monumenti”, XIV Conv. Naz. di Geotecnica.
- CROCE A., JAPPPELLI R., PELLEGRINO A., VIGGIANI C. (1969) – *Compressibility and strength of stiff intact clays*. Proc. VII Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City.
- DILIBERTO S.E. (1998) – *Controllo tettonico sui sedimenti plio-quadernari del bacino di Agrigento (Sicilia centro-meridionale)*. 79° Congresso Nazionale della Società Geologica Italiana. “La Sicilia, un laboratorio naturale nel Mediterraneo, strutture, mari, risorse e rischi”, vol. B.
- ERCOLI L. (1985) – *Il ruolo dell’assetto strutturale della formazione sabbiosa argillosa calcarenitica di Agrigento nei fenomeni di dissesto dei versanti*. Rapporto di ricerca del DISEG, Università di Palermo, (in italiano).
- ERCOLI L., ZIMBARDO M., NOCILLA N., NOCILLA A., PONZONI E. (2014) – *Cliff recession in the Valle dei Templi in Agrigento: a new plan for monitoring, prevention and protection*. Proposto a Engineering Geology.
- EVANGELISTA A., PELLEGRINO A. (1990) – *Caratteristiche geotecniche di alcune rocce tenere italiane*. Atti del terzo ciclo di Conferenze di Meccanica e Ingegneria delle Rocce, MIR90, Torino.
- FRANKLIN J.A., VOGLER U.W., SZLAVIN J., EDMOND J.M., BIENIAWSKI Z.T. (1979) – *Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 16, n. 2, pp. 141-156.
- GRADO G. (2006) – *Studi e ricerche finalizzati alla conservazione e alla tutela del parco archeologico e paesaggistico della valle dei templi di Agrigento*. Tesi di laurea, Università degli Studi di Palermo.
- HOUSTON S.L., HOUSTON W.N., ZAPATA C.E., LAWRENCE C. (2001) – *Geotechnical engineering practice for collapsible soils*. Geotechnical and Geological Engineering, 19, nn. 3-4, pp. 333-355.
- HOUSTON S.L., ELKADY T.Y., HOUSTON W.N. (2003) – *Post-Wetting Static and Dynamic Behavior of Collapsible Soils*. International Conference of Problematic Soils, Nottingham, pp. 63-71.
- JENNINGS J.E., KNIGHT K. (1975) – *A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure*. Proceedings 6th African Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 99-105.
- KÉZDI A. (1974) – *Handbook of Soil Mechanics - Soil Physics*. Elsevier.
- LIN Z. (1995) – *Variation in collapsibility and strength of loess with age*. Proceedings of “NATO Advance Workshop on Genesis and Properties of Collapsible Soils”. Derbyshire E., Dijkstra T. and Smalley I. J. (Eds.). Loughborough, April 1994, pp. 247-265.
- MUSSO A., ERCOLI L. (1988) – *Monuments and Landslides in the Agrigento Valley*. In: Marinou, P.G., and Koukis, G.C., (Eds.) *The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites*, Proceedings of the Symposium of the International Association of Engineering Geology, Athens. Rotterdam, A.A. Balkema, pp. 113-121.
- NOCILLA N., ERCOLI L., ZIMBARDO M., NOCILLA A., MELI P., GRADO G., PARELLO G., PRESTI G. (2013) – *Unsaturated sand in the stability of the cuesta of the Temple of Hera (Agrigento)*. Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites, Bilotta E., Flora A., Lirer S., Viggiani C., Taylor & Francis Group, 1, pp. 603-612.
- NOCILLA N., EVANGELISTA A., SCOTTO DI SANTOLO A. (2009) – *Fragmentation during Rock falls: two italian case studies of hard and soft rocks*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 42, n. 5, pp. 815-833.
- POPESCU M.E. (1986) – *A comparison between the behaviour of swelling and of collapsing soils*. Engineering Geology, 23, n. 2, pp. 145-163.
- ROGERS C. D. F. (1995) – *Types and distribution of collapsible soils*. Proceedings of NATO Advance Workshop on Genesis and Properties of Collapsible Soils. Derbyshire, Dijkstra, and Smalley, (Eds.), Loughborough, April 1994, 1-17.
- RUGGIERI G. (1961) – *Commenti ad una recente nota sul Pliocene in Sicilia*. Riv. Min. Sic., pp. 70-71.

Collapsible soils and instability processes in the Valle dei Templi (Agrigento)

Summary

The sacral complex of the Valle dei Templi in Agrigento, included in the UNESCO Heritage Site List, stands over the crest of a rigid calcarenite cuesta, which overlies a layer of partially saturated carbonate sand. The environment is highly prone to landslides and the calcarenite stratum is often in limit equilibrium conditions. Toppling phenomena threaten some of the more relevant archaeological structures such as the Giunone's Temple, the Vulcano's Temple, the Santuario rupestre and the palaeochristian Necropolis. As highlighted by several previous studies, the instabilities and the recession of slopes have been caused by the undermining of slopes combined with the discontinuity pattern. Recent studies have identified an open and metastable structure, typical of collapsible soils, for the sandy stratum under the calcarenite bench. Relevant vertical strains occur rapidly in the sandy collapsible layer when flooded. By means of in situ investigation, laboratory tests and numerical analyses, the active role of the sandy layer has been highlighted and a new interpretation of instability processes has been proposed.