

RESISTENZA E COLLASSO STRUTTURALE DI UNA SABBIA PARZIALMENTE SATURA

Margherita Zimbardo
Università degli Studi di Palermo
margherita.zimbardo@unipa.it

Elisa Ponzoni
Pizzi Terra S.r.l
e.ponzoni@pizzi-terra.com

Alessandra Nocilla
Università degli Studi di Brescia
alessandra.nocilla@unibs.it

Laura Ercoli
Università degli Studi di Palermo
laura.ercoli@unipa.it

Sommario

Studi recenti hanno evidenziato il ruolo del comportamento meccanico dello strato di sabbie collassabili interposte tra le calcareniti e le sottostanti argille plioceniche nell'evoluzione dei crolli dei costoni su cui sorgono i monumenti storici della Valle dei Templi. Tali sabbie, caratterizzate da una struttura aperta e da ridotti valori del contenuto naturale d'acqua, sembrerebbero soggette ad elevati valori di suzione così come evidenziato dalla curva di ritenzione idrica, ricavata combinando i risultati provenienti da due tecniche differenti basate su evaporazione (Hyprop) e misura di pressione di vapore. La sperimentazione, presentata dagli autori in questa nota, ha consentito di analizzare il comportamento meccanico delle sabbie soggette al collasso strutturale in condizioni di saturazione.

1. Introduzione

L'analisi dei crolli che, anche recentemente, si sono verificati in corrispondenza dei costoni su cui sorgono i monumenti storici della Valle dei Templi ha evidenziato il ruolo, spesso determinante nell'evoluzione dei dissesti, svolto dallo strato di sabbie collassabili interposte tra le calcareniti del costone e le sottostanti argille plioceniche. Tali sabbie, le cui caratteristiche compostionali e tessiturali sono state analizzate in precedenti studi (Zimbardo et al., 2016), sono caratterizzate da una struttura aperta e metastabile e da elevati valori di suzione. In queste sabbie, in funzione della tipologia e distribuzione della microporosità, si formano menischi e tensioni di suzione tra i granuli che conferiscono al materiale una coesione apparente. In seguito all'incremento del contenuto d'acqua e alla conseguente riduzione o annullamento delle forze di suzione (Fredlund & Rahardjo, 1993, Fredlund & Gan, 1995) la struttura può collassare parzialmente o totalmente producendo una riduzione permanente di volume. Fredlund et al. (2009) mettono in luce la repentina del collasso strutturale all'annullarsi dei legami di suzione. Le sabbie indagate mostrano un potenziale di collasso di moderata severità (Nocilla et al., 2013; Jennings & Knight, 1975). A seguito di ciò, e in conseguenza dei ridotti valori delle tensioni di snervamento e della resistenza a trazione delle calcareniti sovrastanti, avviene

la neoformazione delle fratture che determinano l'arretramento delle scarpate (Nocilla et al., 2015). La sperimentazione condotta attraverso l'esecuzione di prove di taglio diretto e isotrope ha evidenziato una differente risposta meccanica delle sabbie in cui i legami interparticellari sono principalmente dovuti alla presenza di tensioni di suzione e quelle in cui i legami interparticellari sono caratterizzati anche da una debole cementazione.

2. Materiale

La formazione di Agrigento è una sequenza regressiva plioleistocenica formata da quattro parasequenze (Fig.1). Ciascuna parasequenza è costituita da uno strato basale di argille (5-15m), un livello intermedio di sabbie addensate (5m) talora debolmente cementate, sovrastate da un banco di calcarenite, con variabile grado di cementazione, il cui spessore è compreso fra 5 e 25m e si riduce bruscamente nel senso dell'immersione. Le sabbie, più o meno addensate e di colore giallastro, sono sistematicamente sede di fenomeni erosivi da cui derivano gli aggetti dei blocchi calcarenitici sovrastanti. La fenomenologia erosiva ha richiesto nel tempo numerosi interventi di sottofondazione prevalentemente localizzati in corrispondenza delle principali emergenze architettoniche. Le discontinuità sub verticali prossime ai cigli del costone sono aperte ed in alcuni casi l'apertura raggiunge valori anche dell'ordine dei decimetri, spia di incipienti condizioni di crollo in genere per ribaltamento. Le sabbie investigate sono state prelevate in corrispondenza del III livello (sabbia A) e del II livello (sabbia B) (Fig.1a). La prima è costituita da clasti di quarzo 40%, micrite 25%, foraminiferi 25%, calcite in forma prevalentemente sparatica 10% (Fig.1b). Nel litotipo B, costituito da clasti di quarzo 50%, micrite e microsparite 30%, foraminiferi e frammenti di gusci di molluschi 15%, entrochi 5%, i clasti non sempre sono in diretto contatto tra loro, per la presenza di patine di cemento che rivestono i grani (Fig.1c).

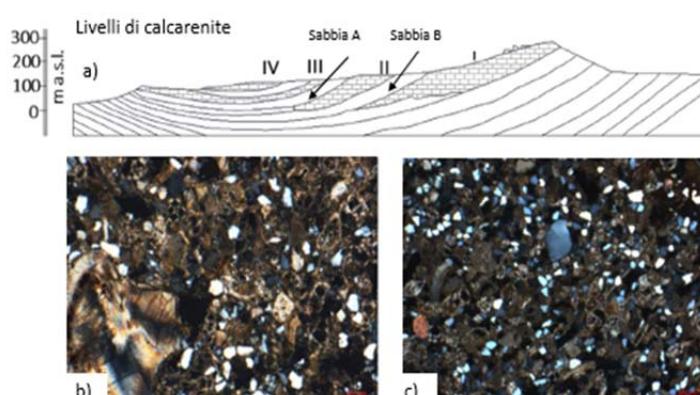


Fig. 1 a) Formazione di Agrigento; b) Sezione sottile litotipo A, 32X; c) Sezione sottile litotipo B, 20X.

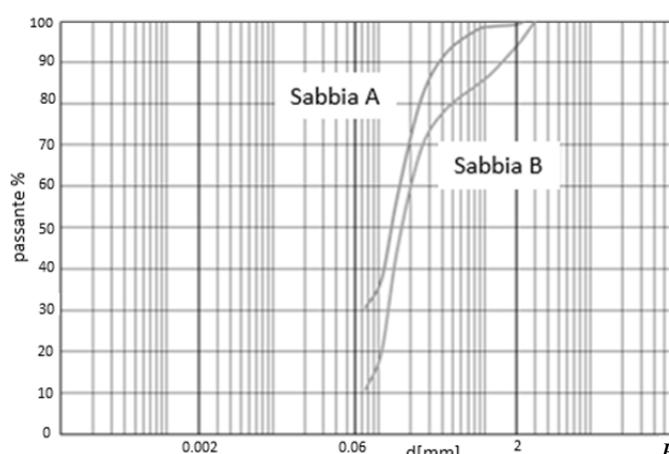


Fig. 2 Analisi granulometrica

perché gli spigoli sono quasi sempre vivi; la sfericità è variabile: i grani di forma euedrale hanno alta sfericità, quelli a bassa sfericità hanno forma per lo più allungata. Il contatto tra i clasti è più frequentemente di tipo lungo, in rari casi di tipo concavo-convesso.

Da un punto di vista granulometrico entrambi i litotipi, classificabili come sabbie fini e medie, sono caratterizzati da un elevato grado di uniformità (Fig.2). Una valutazione indiretta del grado di cementazione è stata effettuata misurando la resistenza alla disaggregazione di campioni di roccia sottoposti a sollecitazioni meccaniche di lieve entità in condizioni di parziale saturazione (slaking test). I risultati sono conformi con quanto indicato con l'analisi petrografica da cui emerge l'entità estremamente ridotta del cemento sulla superficie dei grani della sabbia (B) per la quale sono stati determinati valori dell'indice di durabilità pari al 55%; per la sabbia (A) sono invece stati determinati valori pressoché nulli.

3. Caratterizzazione meccanica

Come ben noto, la resistenza al taglio dovuta agli effetti capillari può essere rimossa da processi di saturazione, come ad esempio quelli che si generano durante eventi piovosi. I processi deformativi che ne derivano portano al collasso strutturale cui conseguono cospicue deformazioni volumetriche.

Al fine di caratterizzare le sabbie durante il processo di instabilità, sul materiale in condizioni sature sono state eseguite prove di taglio diretto (Tab.1), imponendo una velocità di spostamento pari a 0.0024 mm/min. La resistenza al taglio di picco risulta crescente con la σ'_v applicata e si verifica dopo spostamenti orizzontali δ_h compresi tra 1-2.5 mm (Fig. 3); i valori massimi si raggiungono con l'incremento della tensione normale e comunque risultano compresi nell'intervallo dei valori riportati in letteratura per le sabbie dense. La resistenza finale, caratterizzata anche da angoli di dilatanza pressoché nulli, viene raggiunta, generalmente, all'incirca in seguito a spostamenti di circa 1 mm dopo il picco. La caduta di resistenza risulta elevata pari anche al 50% della resistenza di picco. Nel litotipo B le curve $\tau - \delta_h$ evidenziano in alcuni casi cadute e riprese della resistenza con il progredire degli spostamenti, comportamento tipico dei materiali debolmente cementati. L'esame delle superfici di rottura ha evidenziato in questi casi la presenza di noduli di sabbia di consistenza maggiore di quella della sabbia circostante sul piano del taglio.

Test	n%	S	σ'_v [kPa]	τ_p [kPa]	τ_i [kPa]
SHA1	43	0.87	50	108	57
SHA2	37	1	100	178	87
SHA3	42	0.98	150	217	120
SHA4	39	1	200	256	160
SHB1	45.5	0.73	50	155	60
SHB2	44	0.80	50	217	54
SHB3	54	0.73	100	142	125
SHB4	53.5	0.74	150	187	147
SHB5	43	0.90	200	283	199

Tab. 1 Prove di taglio

spostamenti, comportamento tipico dei materiali debolmente cementati. L'esame delle superfici di rottura ha evidenziato in questi casi la presenza di noduli di sabbia di consistenza maggiore di quella della sabbia circostante sul piano del taglio.

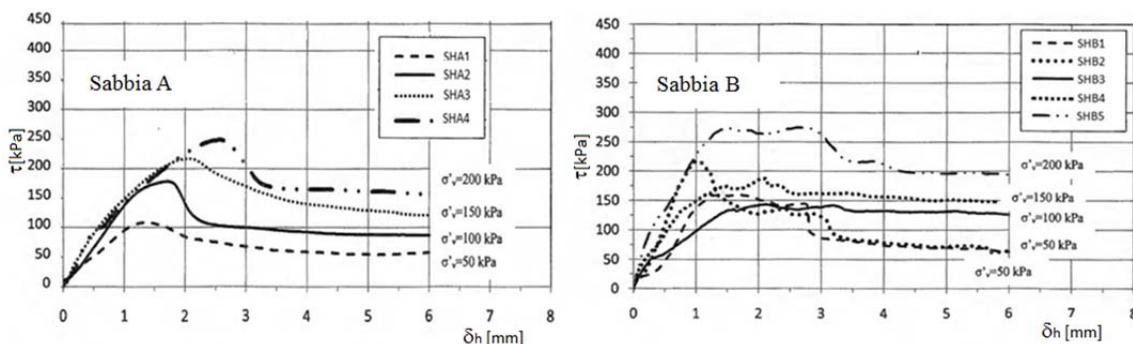


Fig.3 Prove di taglio: andamento $\tau - \delta_h$

Il valore massimo dell'angolo di dilatanza, in genere quasi sempre raggiunto in corrispondenza del picco, risulta compreso tra 10° e 30° . All'aumentare della tensione effettiva verticale, il contributo della dilatanza alla resistenza al taglio di picco si riduce. Nei diagrammi $\tau_p - \sigma'_v$ di fig.4 sono riportati gli inviluppi di rottura di picco e finale. Il coefficiente di correlazione risulta essere molto elevato ($R^2=0.98$) nel caso del litotipo A e pari a 0.58 per il litotipo B in cui sono presenti areole a grado di cementazione variabile e sul quale sono ancora in corso sperimentazioni più approfondite.

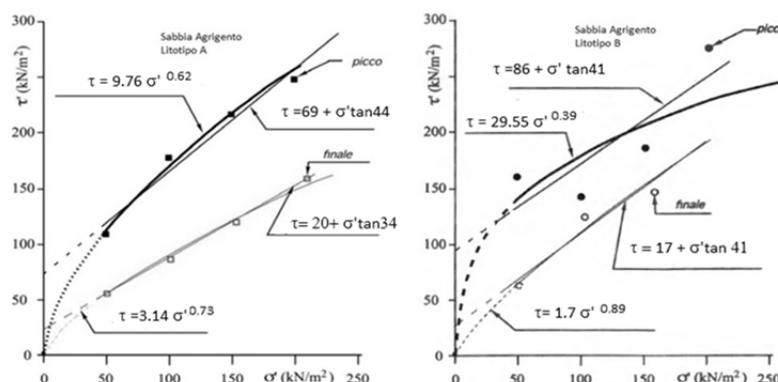


Fig.4 Prove di taglio: inviluppi di rottura

Le prove isotrope (Tab.2) sono state condotte applicando incrementi di carico sferico controllato con una velocità di applicazione del carico pari a 10kPa/min. Ciascun incremento di carico è stato mantenuto per un tempo compreso tra 48/84 ore fin quando le sovrappressioni neutre indotte si erano dissipate e conseguentemente si erano annullate le ulteriori variazioni di volume del campione. Riportando i risultati nel piano v-p' (Fig.5) è possibile distinguere per entrambi i litotipi una fase di pre-snervamento, snervamento e post-snervamento. Nel primo tratto, ad andamento lineare, il materiale mostra un comportamento rigido con deformazioni di modesta entità. L'indice dei vuoti si mantiene all'incirca costante fino a quando non viene raggiunta la tensione di snervamento in corrispondenza della quale si verifica un processo di destrutturazione, che nel caso del litotipo A risulta essere più graduale. Per questo litotipo infatti non è stato individuato un chiaro valore della tensione di snervamento; è probabile infatti che la destrutturazione del materiale sia avvenuta nella fase di saturazione, per cui il materiale esibisce il tipico andamento di una sabbia sciolta che va compattandosi all'aumentare della tensione applicata. Il meccanismo di deformazione non sembra essere dovuto a fenomeni di rottura delle particelle così come evidenziato dall'analisi delle sezioni sottili

Test	e_o	e_{sat}
IS-A1	0.74	0.51
IS-A2	0.68	0.46
IS-B1	0.72	0.70
IS-B2	0.81	0.79
IS-B3	0.78	0.76

Tab. 2 Prove isotrope

eseguite sul materiale dopo la prova (Fig.6). Le dimensioni dei grani risultano invariate (quarzo 300÷70 μm , foraminiferi 100÷300 μm , litoclasti e calcitici 50÷100 μm). Per tensioni superiori a 2.9 MPa le due curve convergono verso un'unica NCL. Nel litotipo B, in cui i legami interparticellari sono dovuti sia a tensioni di suzione che a cementazione, l'andamento delle curve è quello tipico di una roccia tenera, l'innesto del processo di destrutturazione è più marcato e si registrano valori della tensione di snervamento che aumentano al diminuire dell'indice dei vuoti iniziale. Anche per questo litotipo indipendentemente dal volume specifico iniziale, e per tensioni superiori a 4.5MPa le curve tendono a convergere verso un'unica NCL. La differente localizzazione delle due NCL testimonia differenti meccanismi di deformazione.

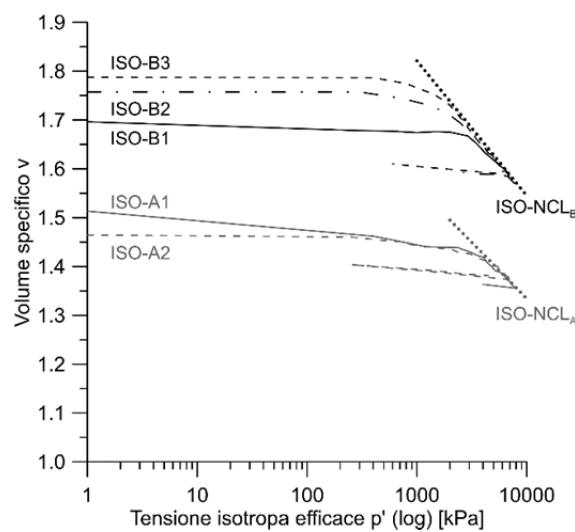


Fig. 5 Prove isotrope: variazione del volume specifico

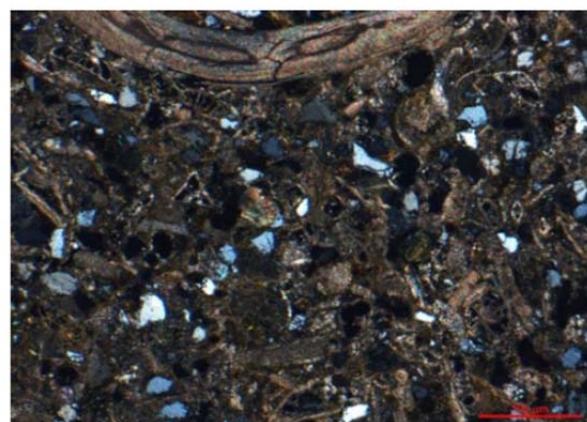


Fig. 6 Sezione sottile litotipo A dopo prova isotropa 32X

Una preliminare fase di indagine del materiale in condizioni di parziale saturazione, svolta presso il laboratorio di geotecnica di TuDelft ha permesso di ricostruire la curva di ritenzione idrica della sabbia combinando i risultati provenienti da due diverse apparecchiature: Hyprop (UMS), che permette di determinare la curva di ritenzione e la condutività non satura dei terreni mediante il metodo evaporimetrico, e il potenziometro WP4C Dewpoint PotentiaMeter (Decagon Devices Inc.). Come proposto da Maček et al. (2013), tale combinazione è utile per estendere il range di misura, ristretto a fasce diverse per ciascuno degli strumenti disponibili. Mentre tramite Hyprop è stato possibile

registrare valori di pressione compresi tra 0 e -100kPa circa, il WP4C è stato utilizzato per valori di pressione compresi in generale tra -1000kPa e -200000kPa. La fase di evaporazione dei campioni nel corso delle prove qui presentate è avvenuta in una camera a temperatura (T) e umidità controllata (HR): HR=50-55% e T=24-25°. Con l'Hyprop un campione di terreno, confinato lateralmente da un anello rigido, viene lasciato essiccare naturalmente: attraverso la superficie superiore del campione a contatto con l'atmosfera si instaura un processo di evaporazione dovuto alla differenza di umidità tra i due elementi. Durante la prova, vengono quindi misurati le variazioni di massa, i valori di suzione, mediante due mini-tensiometri inseriti a diversi livelli all'interno del campione, e la temperatura del terreno. Il potenziometro WP4C usa la tecnica dew point per misurare la pressione di vapore dell'aria in equilibrio con il campione contenuto in una camera stagna. L'acqua presente nel campione allo stato liquido viene equilibrata dall'acqua in fase gassosa presente nella camera isolata. Nel momento in cui l'acqua inizia a condensare su di un vetro presente nella camera stagna, vengono registrati i valori di temperatura e pressione. È importante sottolineare che tale metodo permette la misura della suzione totale, somma di suzione osmotica, dovuta alle forze di assorbimento che legano l'acqua alla matrice di terreno, e di suzione di matrice potenziale del terreno, dipendente dalla concentrazione di sostanze dissolte nell'acqua. I campioni per l'Hyprop ($d=80$ mm, $h=50$ mm), sono stati saturati mediante filtrazione dal basso verso l'alto e risalita capillare. Tale tecnica, di semplice realizzazione, difficilmente permette di raggiungere una saturazione completa, specie in presenza di una rete di pori complessa. Il campione utilizzato per il potenziometro WP4C risulta invece caratterizzato da diametro di 37 mm e altezza pari a 4.5 mm. In Tab.3 vengono presentate le proprietà indice e la granulometria dei campioni testati.

Test	w_0	S_0	v_0	Argilla %	Limo%	Sabbia %	Ghiaia %	entrata aria MPa	λ
DA1	0.21	0.77	1.73					0.03	0.28
DA2	0.19	0.76	1.67		25	73	2	0.02	0.26
DA3	0.19	0.72	1.74					0.02	0.26

Tab. 3 Valori iniziali Hyprop. Campioni remoulded, con grado di saturazione diverso dal naturale

In Fig. 7 sono riportati i punti sperimentali relativi alla variazione della suzione in funzione del grado di saturazione, registrata mediante prove Hyprop e WP4C. La curva sperimentale proveniente dall'Hyprop è stata individuata considerando una suzione pari al valor medio tra le letture ai due mini-tensiometri. I risultati sperimentali sono stati interpolati mediante una curva teorica, ottenuta applicando il modello di van Genuchten (1980). In tab.3 sono riportati i valori di entrata aria, della funzione di forma λ e del grado di saturazione. Per tutti i campioni il valore residuo del grado di saturazione è pari a zero. Seppur simili tra di loro, tali curve non sono coincidenti. Queste differenze

nella proprietà di ritenzione di campioni dello stesso terreno sono spiegabili dal fatto che le curve di ritenzione dipendono oltre che dalla struttura, dall'indice dei vuoti e dal network di pori stesso all'interno del campione (Vanapalli et al.,1999; Tarantino & Tombolato,2005; Cafaro & Cotecchia,2005; Romero et al.,2011; Casini et al.,2012; Gomez et al.,2012). In questo caso a parità di struttura sembra possibile che la mancata definizione di un'unica curva di ritenzione possa essere dovuta ad una variabilità di aggregazione e posizione dei pori di ciascun campione, all'interno di una struttura complessa.

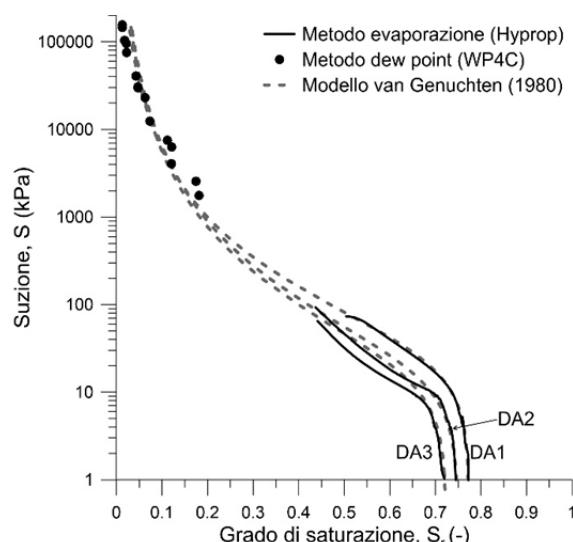


Fig. 7 Curve di ritenzione idrica

4. Conclusioni

Lo studio sperimentale rivolto a determinare le caratteristiche meccaniche delle sabbie soggette al collasso strutturale in condizioni di saturazione ha evidenziato differenti risposte meccaniche in funzione dei caratteri tessiturali del materiale. In particolare per il litotipo A in cui i legami interparticellari sono caratterizzati prevalentemente da tensioni di suzione il processo di destrutturazione è da attribuire esclusivamente all'annullamento delle tensioni di capillarità cui conseguono immediate deformazioni; nel litotipo B in cui è presente pure una debole cementazione la risposta meccanica assume anche aspetti tipici delle rocce tenere. I risultati delle prove mostrano, inoltre, valori di suzione molto elevati. Ciò comporta l'aumento della resistenza al taglio delle sabbie e la possibilità di sostenere elevati stati tensionali che giustificherebbero quanto osservato in situ sulle condizioni di stabilità globale dei costoni. Le indagini fino a qui sviluppate consentono di ipotizzare una diversa chiave di lettura dei processi di instabilità che interessano il territorio della città di Agrigento e in particolare della zona della Valle dei Templi, processi di instabilità che diventano sempre più accentuati considerato che, nel bacino mediterraneo, si assiste ad una progressiva estremizzazione del clima con periodi di accentuata siccità e periodi di precipitazioni intense e concentrate che amplificano la vulnerabilità dei terreni strutturati collassabili. Si ritiene peraltro che un'adeguata conoscenza del comportamento meccanico di tali terreni sia indispensabile per la progettazione di efficaci interventi di salvaguardia.

Ringraziamenti

Si ringrazia la Prof. Cristina Jommi per la supervisione delle prove sperimentali di misura diretta della suzione.

Bibliografia

- Cafaro, F., Cotecchia, F. (2005). "A structure-based approach to the estimate of the water retention curve of soils". Proc. 16th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka.
- Casini, F., Vaunat, J., Romero, E., Desideri, A. (2012). "Consequences on water retention properties of double-porosity features in a compacted silt", *Acta Geotechnica*, 7, 139–150.
- Ercoli, L., Zimbardo, M., Nocilla, N., Nocilla, A., Ponzoni, E. (2015). "Evaluation of cliff recession in the Valle dei Templi in Agrigento (Sicily)", *Engineering Geology*, 192, 129-138.
- Fredlund DG., Rahardjo H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. Wiley and Sons Inc., New York.
- Fredlund DG., Gan JKM.(1995)."The collapse mechanism of a soil subjected to one-dimensional loading and wetting" Proc. Advance Workshop on Genesis and Properties of Collapsible Soils, Loughborough 173-205
- Gomez, R., Romero, E., Della Vecchia, G., Jommi, C., Suriol, J., Lloret, A. (2012). "Water Retention Properties of a Compacted Clayey Silt Including Void Ratio Dependency and Microstructural Features". In Unsaturated soils: research and applications, Eds. C. Mancuso, C. Jommi and F. D'Onza, 53-158. Heidelberg, Springer.
- Jennings, J.E., Knight,K. (1975). "A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure". Proc. 6th African Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering
- Máček, M., Smolar, J., Petkovšek, A. (2013). "Extension of measurement range of dew-point potentiometer and evaporation method". Proc. of the 18th ICSMGE, Paris.
- 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)". Proc. of the 2nd Int. Symp. on Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites, 603-611
- Romero, E., Della Vecchia, G., Jommi, C. (2011). "An insight into the water retention properties of compacted clayey soils", *Géotechnique*, 61(4), 313–328.
- Tarantino, A., Tombolato, S. (2005). Coupling of hydraulic and mechanical behaviour in unsaturated compacted clay. *Géotechnique*, 55 (4), pp. 307-317.
- van Genuchten, R. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 892-898.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E. (1999). "The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till", *Géotechnique*, 49, 143-159.
- Zimbardo, M., Ercoli, L., Megna, B. (2016). "The open metastable structure of a collapsible sand: fabric and bonding", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75 (1), 125-139