

CRITICITA' NELLA MODELLAZIONE GEOTECNICA DELLA SUBSIDENZA DELL'AREA DI SIBARI (CALABRIA)

Francesco Cafaro, Federica Cotecchia, Vincenzo Lenti

Politecnico di Bari

f.cafaro@poliba.it

Rossella Pagliarulo

CNR – IRPI Bari

r.pagliarulo@ba.irpi.cnr.it

Sommario

In questa nota si espongono alcuni risultati di una ricerca interdisciplinare sulla subsidenza della Piana di Sibari e più specificamente dell'omonimo sito archeologico. Lo studio è consistito nella definizione di differenti modelli geotecnici e nella simulazione numerica della subsidenza, sotto plausibili ipotesi sulle condizioni idrauliche al contorno. Il confronto con dati di monitoraggio relativi al tasso di subsidenza attuale e recente, ottenuti tramite telerilevamento, ha fornito indicazioni sulle principali cause della subsidenza di natura geotecnica.

La subsidenza a Sibari

La piana di Sibari costituisce una “anomalia” nell'ambito del movimento tettonico dell'area in cui ricade. Con specifico riferimento alla zona del Parco Archeologico, le ricerche hanno evidenziato un fenomeno di subsidenza testimoniato dalla presenza di tre città sovrapposte (Figura 1): Sybaris (720-510 BC), Thurium (444- 285 BC) e Copia (193 BC) attualmente ad una profondità che varia da 7 a 3,5 m al di sotto del piano campagna. Il tasso della subsidenza connessa alla consolidazione per peso proprio dei sedimenti pleistocenici ed olocenici, stimato al netto delle variazioni di quota di natura tettonica e glacioeustatica (Cotecchia et al. 1971; Pagliarulo et al. 1995; Coop e Cotecchia 1997), è andato via via riducendosi, ma negli ultimi decenni la velocità di abbassamento del suolo è diventata importante anche per cause antropiche, riconducibili essenzialmente all'azione del sistema wellpoints impiegato da qualche decennio per il dewatering degli scavi archeologici e agli emungimenti attivi nell'acquifero più profondo, in particolare nei livelli ad elevata permeabilità sottostanti l'orizzonte a grana relativamente fine (per profondità superiori ai 70 metri). Il tasso attuale, con riferimento all'area archeologica, è desumibile dalla Figura 2, dove sono rappresentati dati di monitoraggio (Giannico, Rocca e Ferretti 2009) rivenienti da una collaborazione tra il Politecnico di Milano e la società Tele-Rilevamento Europa 2009, i quali indicano valori di 3-5 mm/anno per l'area di Parco del Cavallo.

Definizione del modello geotecnico

La caratterizzazione geotecnica del sito si è avvalsa di una inusuale mole di dati riveniente da campagne d'indagine pregresse svolte sin dagli anni '50 sulla Piana di Sibari (Cotecchia et al. 1971; Cotecchia e Pagliarulo 1996): trivellazioni profonde e pozzi, su un'area più estesa, 13 sondaggi geognostici superficiali (mediamente di una decina di metri) e 5 sondaggi profondi

(compresi tra 50 e 120 metri di profondità) su un'area più circoscritta, essenzialmente riferibile alla zona archeologica. Sono state condotte prove meccaniche (Coop e Cotecchia 1997) di laboratorio, su campioni prelevati a varie profondità, e prove in situ, pressiometriche e di permeabilità, che hanno consentito di desumere parametri di resistenza e rigidità a taglio, di compressibilità e di permeabilità: per gli strati non interessati da una diretta caratterizzazione meccanica, la banca-dati dei parametri impiegati nella modellazione è stata arricchita di valori desunti mediante correlazioni (Burland 1990; Coop e Cotecchia 1995; 1997) con la composizione e la struttura di questi terreni poco sensitivi ed essenzialmente normalconsolidati.

Ai fini della modellazione geotecnica della subsidenza, si sono individuati tre profili stratigrafici significativi (Figura 3). Da ciascuno di essi si è dedotto un modello geotecnico di sottosuolo. Allo scopo di generare un modello rappresentativo di tutta l'area di interesse, il processo di selezione dei parametri è stato anche applicato considerando la variabilità con la profondità dei dati uniti di tutti e tre i sondaggi. Il modello che ne è scaturito (CE, "colonna equivalente") è illustrato in Figura 4.

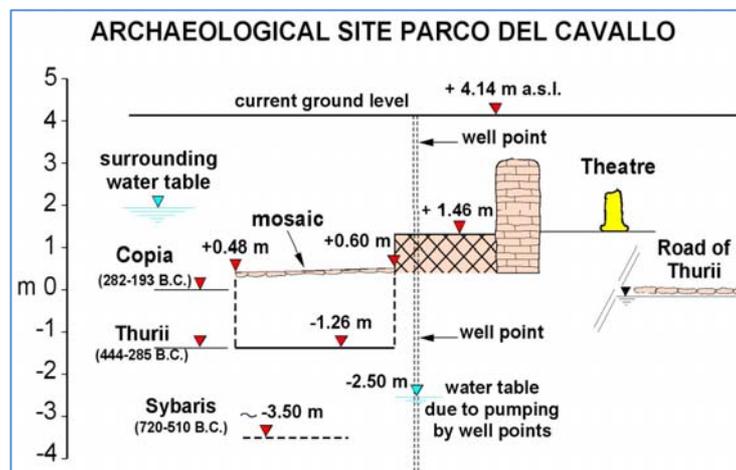


Figura 1. Sito archeologico di Parco del Cavallo a Sibari con indicazione dei tre livelli insediativi (da Coop e Cotecchia 1997).

In sostanza, sulla base della stratigrafia del sito si possono identificare tre orizzonti principali. Il primo rappresenta le sabbie limose dei primi 35-40 metri; il secondo lo strato più propriamente coesivo delle argille limose tra i 35 ed i 70 metri; il terzo rappresenta lo strato ghiaioso sede dei suddetti emungimenti.

L'assetto idraulico è stato impostato alla luce delle condizioni di carico a regime nei due acquiferi considerati:

- Superficie di falda nell'acquifero freatico superiore a -2 metri dal p.c. Pressioni interstiziali negative al di sopra della superficie libera di falda, con variazione "idrostatica".
- Altezza piezometrica nell'acquifero inferiore a + 0.5 m sul p.c.

Poiché le variazioni in carico idraulico nei due acquiferi è stata ciclica negli ultimi 65 anni, considerando la prima attivazione dei well points nel 1945, nella modellazione si è dovuto tenere presente tale complessa evenienza. Essendo la variazione di tali condizioni al contorno, benché complessivamente ciclica, caotica nel dettaglio temporale e spaziale, si è svolta una

simulazione mirata a validare l'ipotesi che il tasso di subsidenza monitorato negli ultimi 50 anni sia sostanzialmente giustificato dalle oscillazioni di falda dianzi citate. In sintesi è stato condotto uno studio parametrico della risposta del modello geotecnico ricostruito alle escursioni di carico idrico, entro intervalli plausibili, nelle falde superiore ed inferiore, assunte indipendenti.

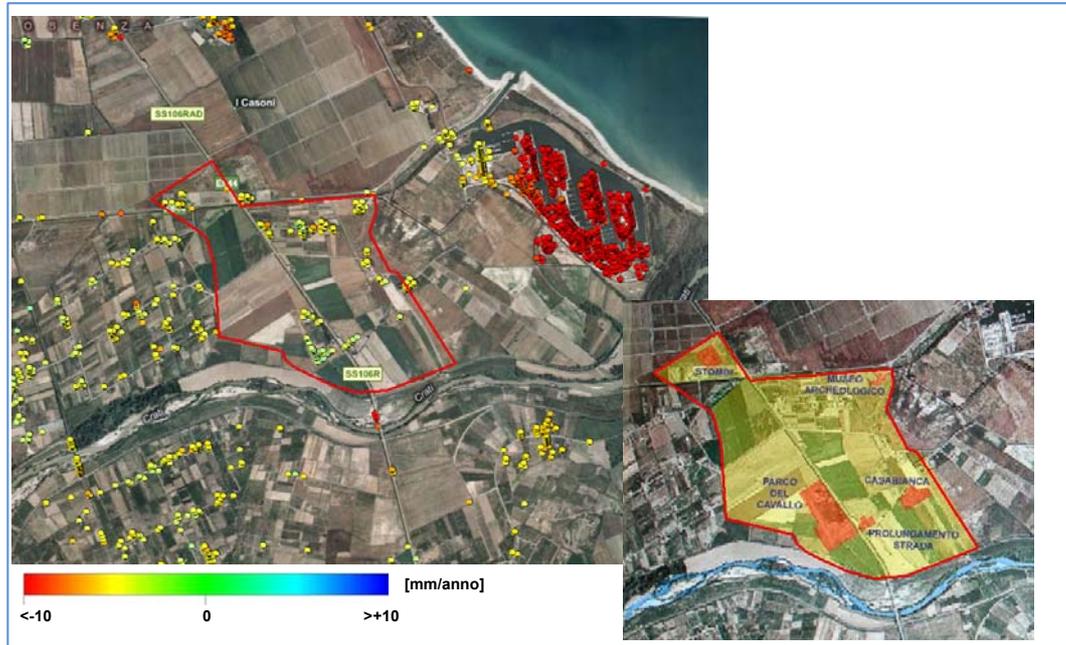


Figura 2. Subsidenza attuale dell'area archeologica di Sibari e della zona costiera orientale (Giannico, Rocca e Ferretti, 2009; Copyright: Tele-Rilevamento Europa 2009)

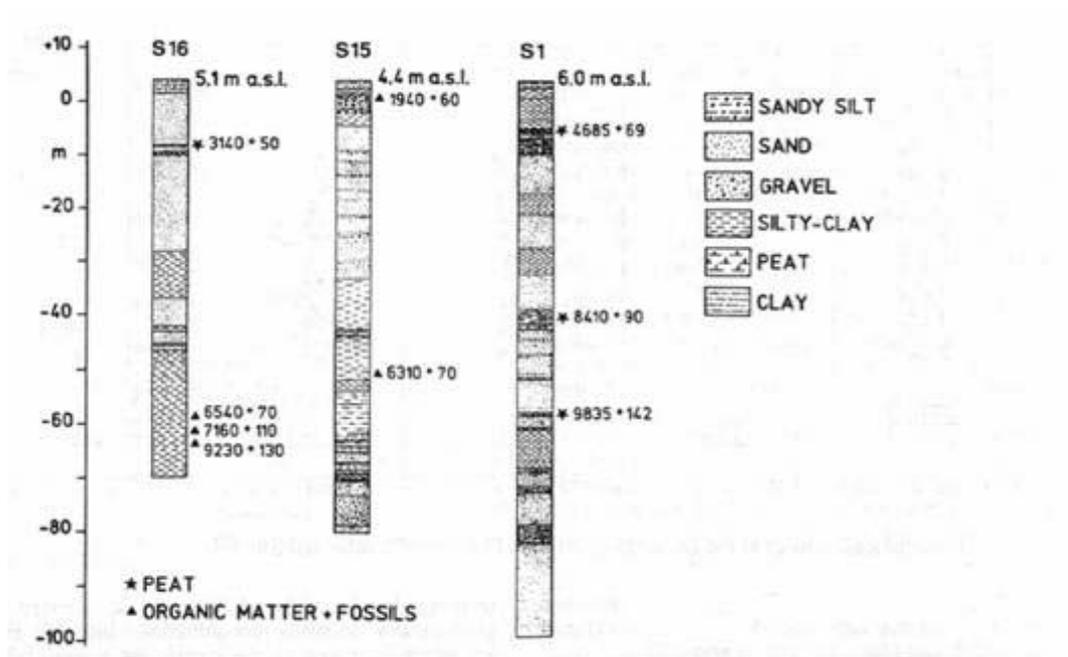


Figura 3 - Litologia ed età dei sedimenti a Sibari (da Pagliarulo et al. 1995)

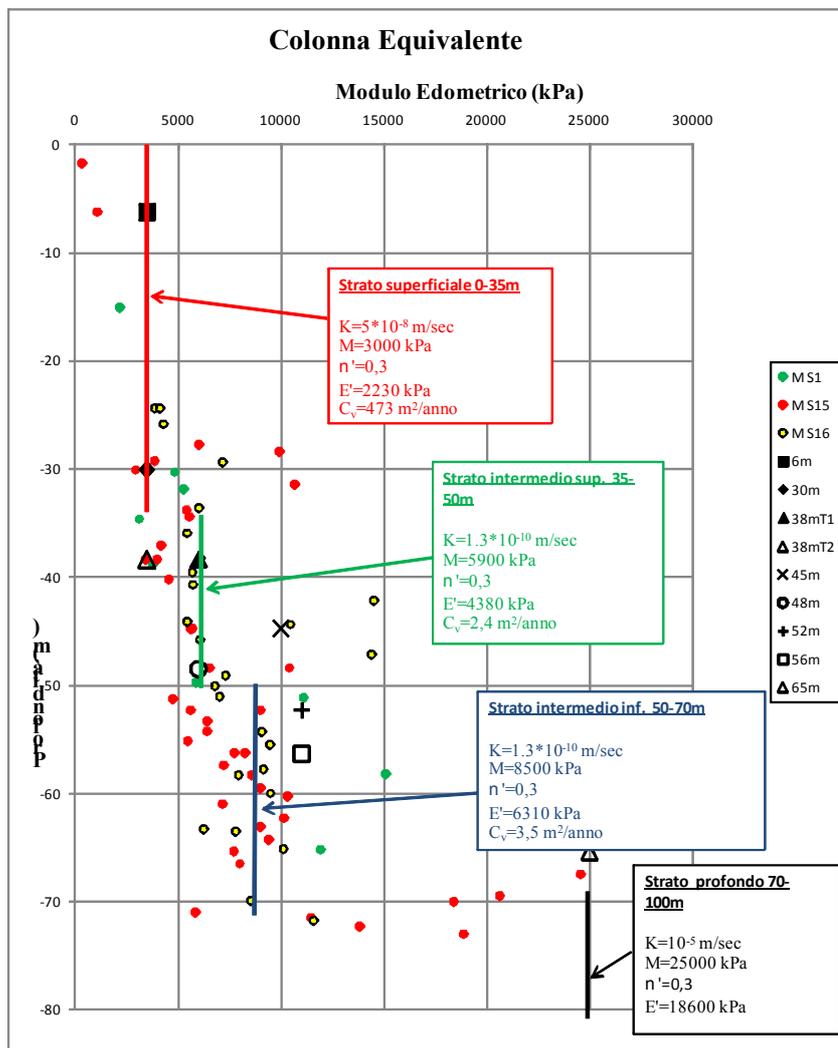


Figura 4. Modello geotecnico "CE" (colonna equivalente)

Calcolo FEM e considerazioni conclusive

Il calcolo della subsidenza è stato svolto agli elementi finiti mediante il codice Plaxis 8.6. I calcoli hanno fatto riferimento alla subsidenza di origine antropica generata, come detto, dall'emungimento idrico nelle falde superficiale e profonda, risolvendo la consolidazione accoppiata. Si è assunto che da tale emungimento, che determina variazioni di carico idraulico nelle falde, derivino condizioni di deformazione edometrica e che non ci sia contribuito sostanziale (alla subsidenza attuale) dei terreni più profondi di 100m, al di sotto dell'acquifero ghiaioso. Il calcolo è stato svolto, per ogni modello, imponendo l'abbassamento della superficie di falda nell'acquifero superiore rispettivamente di 1 e 2 metri e l'abbassamento del livello di alimentazione dell'acquifero profondo rispettivamente di 1, 2 e 3 metri. Combinando tra di loro le condizioni di abbassamento del carico qui citate per le due falde, si sono ottenute nove combinazioni possibili ed il calcolo è stato svolto per tutte queste combinazioni.

In Tabella 1 sono riepilogati in modo sintetico i risultati del calcolo, per la totalità delle condizioni idrauliche al contorno assunte nelle analisi, sia per il caso di “colonna equivalente” che per i tre casi di modelli geotecnici desunti dai sondaggi S1, S15, S16 considerati separatamente, i quali consentono di tener conto dell’eterogeneità orizzontale e verticale dei depositi. I risultati dimostrano che il cedimento registrato con topografia tradizionale a Parco del Cavallo nell’ultimo cinquantennio, ossia 12 cm, rientra pienamente nell’intervallo dei cedimenti previsti e se ne può attribuire la causa ad una consolidazione primaria da emungimento idrico in profondità. Inoltre, il confronto dei dati di monitoraggio in Figura 2 con le previsioni numeriche consente di dedurre che la reale situazione idraulica che ha indotto la subsidenza di natura antropica è compresa negli intervalli di oscillazione piezometrica che sono stati qui indagati.

Si può dire in questo caso che, da un lato la bontà della caratterizzazione geotecnica del substrato, resa possibile dalla mole di dati sperimentali raccolti negli anni sia in sito che in laboratorio, e dall’altro l’accuratezza delle misure di subsidenza ottenute tramite telerilevamento, hanno consentito di modellare il processo pur nell’incertezza del tempo di avvio della consolidazione primaria, ponendo in variazione le condizioni idrauliche al contorno, spesso di non facile rilevazione in contesti idrogeologici a sfruttamento “eterogeneo”. Un altro aspetto “critico” nella modellazione del tasso di subsidenza dei terreni di Sibari, che ospitano anche livelli di torba, è la possibilità che all’aliquota residua di consolidazione primaria sia sovrimposta un’aliquota di cedimento connessa alla consolidazione secondaria dei sedimenti. Lo studio di tale componente è stato avviato ma sono necessari ulteriori approfondimenti per dedurre conclusioni in merito.

RISULTATI	CE	S1	S15	S16
Cedimento massimo (cm)	31	37	36	27.5
Cedimento a 10 anni max. (cm)	27.5	34.5	33.5	25
Cedimento minimo (cm)	6	10	6.5	5.5
Cedimento a 10 anni min. (cm)	5	9	6	4.5
Velocità a 1 anno max. (mm/y)	20	38	22.5	15
Velocità a 1 anno min. (mm/y)	4	10	4.5	3.5
Velocità a 10 anni max. (mm/y)	3	5	3	3.3
Velocità a 10 anni min. (mm/y)	1	1	1	1
Velocità a 30 anni max. (mm/y)	1.5-2	2	3	1.5
Velocità a 30 anni min. (mm/y)	0.5-1	1	1	0.5-1

Tabella 1 – Riepilogo dei risultati del calcolo FEM: entità e velocità di subsidenza

Ringraziamenti

La ricerca è stata svolta nell'ambito degli studi finanziati con il POR Calabria 2000-2006.

Bibliografia

- Cherubini C., Cotecchia V., Pagliarulo R. (2000) Subsidence in the Sybaris Plain (Italy). In Carbognin L., Gambolati G., Johnson A.I. (Eds). "Land Subsidence" –Vol.1. Proceedings of the 6th International Symposium on Land Subsidence. Ravenna. 3- 15.
- Coop. M.R., Cotecchia F. (1997) "The geotechnical settlements of the archaeological site of Sibari". Geotech. Eng. for the Preservation of Monuments and Historic Sites, Viggiani (ed.), Balkema, 89-100.
- Cotecchia V., Dai Pra G., Magri G. (1971) Morfogenesi litorale olocenica tra Capo Spulico e Taranto nella prospettiva della protezione costiera. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, 6. 65- 78.
- Cotecchia V. Pagliarulo R. (1996) State of the art in geological, hydrogeological and geotechnical researches carried on the archaeological site of Sybaris. *Geologia Applicata e Idrogeologia*. Vol. XXXI, pp. 43-54.
- Ferranti L., Pagliarulo R., Antonioli F., Randisi A. (2010) Punishment for the sinner: Holocene episodic subsidence and steady tectonic motion at ancient Sybaris (Calabria, southern Italy) *Quaternary International*, doi:10.1016/j.quaint.2010.07.014, 1-15.
- Lambeck K, Antonioli F., Purcell F., Silenzi S. (2004) Sea-level change along the Italian coast for the past 10,000 yr. *Quaternary Science Reviews*, 23. 1567-1598.
- Pagliarulo R., Cotecchia F. (2000) Le influenze dell'evoluzione geoambientale e della compressione dei sedimenti sulla scomparsa dell'antica Sybaris. Proceedings GeoBen 2000 "Geological and geotechnical influences in the preservation of historical and cultural heritage". Lollino G. Editor. Torino, 715- 722.
- Pagliarulo R. (2002) The glacio-eustatic control on the evolution of the Sibari alluvial plain (Southern Italy), I Workshop "Late Quaternary sea level changes and coastal zone evolution", Mastronuzzi G., Sansò P. (Eds), GI 2 S Coast, Research Publication 1, 57- 60.
- Pagliarulo, R., Cotecchia, F., Coop, M.R., Cherubini, C., (1995). Studio litostratigrafico e geotecnico della Piana di Sybaris con riferimento all'evoluzione morfologica e ambientale del sito archeologico. *Geologia Applicata e Idrogeologia*. 30, 375-391