

CAPACITÀ DI UN MODELLO COSTITUTIVO AVANZATO DI COGLIERE IL COMPORTAMENTO A COMPRESSIONE DI UNA ROCCIA TENERA

Anita Laera*, Federica Cotecchia, Gaetano Elia, Francesco Cafaro

Politecnico di Bari

**anita.laera@poliba.it*

Adrian Mifsud

University of Malta

adrian.mifsud@um.edu.mt

Sommario

In questa nota viene presentata la calibrazione di un modello costitutivo multi-superficie ad incrudimento misto isotropo-cinematico per la simulazione di prove di compressione monodimensionale e isotropa su campioni di roccia tenera allo stato naturale e ricostituito. Dopo la descrizione delle caratteristiche micro e macro-strutturali del materiale oggetto di studio, i risultati delle simulazioni delle prove di laboratorio sono mostrati a confronto con i dati sperimentali.

1. Introduzione

Le rocce tenere possono essere considerate, dal punto di vista meccanico, dei materiali di transizione tra i terreni e le rocce. La loro risposta meccanica è fortemente influenzata dallo stato tensionale, mostrando un comportamento più simile a quello di una roccia a basse pressioni (elevata rigidità iniziale, fragilità a taglio) e a quello di un terreno ad alte pressioni (minore rigidità iniziale, duttilità a taglio) (Pellegrino, 1970). Numerose osservazioni sperimentali hanno rivelato diverse analogie tra il comportamento delle rocce tenere e quello delle argille naturali, sebbene la natura dei legami interparticellari sia diversa (Leroueil e Vaughan, 1990; Anagnostopoulos *et al.*, 1991; Razoaki, 2000). In entrambi i casi, la “struttura” permette al materiale di raggiungere in compressione stati che superano la curva del corrispondente materiale ricostituito nel piano σ'_v-e , seppure l’ulteriore applicazione del carico induca una progressiva degradazione ed indebolimento dei legami interparticellari alle alte pressioni (Burland, 1990; Cotecchia e Chandler, 1997). L’analisi di tali analogie consente di ipotizzare una estensione del quadro interpretativo fornito dalla Teoria della Meccanica dello Stato Critico per i terreni (Schofield e Wroth, 1968; Roscoe e Burland, 1968) al caso delle rocce tenere. In quest’ottica, a partire dal lavoro di Gens e Nova (1993), sono stati sviluppati vari modelli costitutivi, tipicamente a singola superficie, per descrivere la risposta meccanica delle rocce tenere (es. Adachi e Oka, 1995; Boldini *et al.*, 2019).

La nota mostra la simulazione del comportamento a compressione di una roccia tenera, sia allo stato naturale che ricostituito, attraverso l’uso del modello multi-superficie ad incrudimento misto isotropo-cinematico originariamente proposto da Rouainia e Muir Wood (2000) per argille naturali. In particolare, si fa riferimento al comportamento meccanico esibito da alcuni campioni appartenenti alla formazione denominata *Middle Globigerina Limestone* (MGL), presente in larga parte nell’isola di Malta, che è stata studiata sperimentalmente alla scala micro- e macro-strutturale durante il lavoro di dottorato del Dr. Mifsud (2019). L’articolo descrive la procedura di calibrazione dei parametri e di inizializzazione delle variabili interne del modello costitutivo avanzato adottato, guidata dall’interpretazione fenomenologica dei dati sperimentali.

2. Caratteristiche del materiale

I campioni appartenenti alla formazione MGL sono stati prelevati presso Mriehel, località situata nella parte centrale dell'isola di Malta. Nell'ambito della stessa formazione, sono state individuate tre zone litologiche diverse: zona A, corrispondente all'orizzonte di terreno organico, zona B, caratterizzata dalla roccia esposta a processi di weathering, e zona C, ovvero la roccia intatta. In questo articolo si fa riferimento ai campioni prelevati nei pressi della chiesa St. Marija, indicati come C2 e appartenenti alla zona C. Il sito è stato oggetto di studi per identificare le cause di problemi strutturali che hanno interessato la chiesa, le cui fondazioni poggiano proprio su questa roccia tenera. L'altitudine del sito è di +38.9 m sul livello del mare e la profondità di prelievo dei campioni è di 2.9 m dal piano campagna.

La curva granulometrica dei campioni C2 indica un materiale caratterizzato da particelle di dimensione inferiore a 0.04 mm, di cui circa il 37% ha dimensione inferiore ai 0.002 mm. Il contenuto carbonatico misurato con il calcimetro Dietrich-Fruhling varia tra il 90.6% e 94.5%, permettendo di collocare il materiale nella fascia dei calcari marnosi secondo il sistema di classificazione di Fookes e Higginbottom (1975). Per l'analisi della frazione più fine, i provini sono stati disciolti in acido cloridrico per rimuovere la frazione carbonatica e, successivamente, sono stati sottoposti a sedimentazione. Lo studio mineralogico tramite diffrazione dei raggi X della porzione sedimentata ha rivelato la presenza di minerali argillosi caratterizzati da un'alta attività, come smectiti (90.8%) e illiti-muscoviti (9.2%). Altri minerali presenti in piccolissime quantità sono quarzo, feldspati, plagioclasti, ematite e goethite. Le proprietà indice attestano un materiale poco plastico (indice di plasticità tra 13.5% e 14.5%) e inattivo (indice di attività pari a 0.4), mentre l'analisi mineralogica e morfologica al microscopio indica la presenza di particelle di dimensioni inferiori a 0.004 mm di natura non argillosa: il materiale è classificabile come calcare marnoso; una classificazione più specifica potrebbe essere attribuita su base genetica e tessiturale (Bosellini *et al.*, 1989; Mifsud *et al.*, in prep.).

La microstruttura del materiale è stata investigata tramite microscopio elettrico a scansione (SEM) su provini di materiale sia intatto che ricostituito, a monte e a valle delle prove di compressione ad alte pressioni. In Figura 1a è riportata un'immagine a ingrandimento x2000 di un campione indisturbato caratterizzato da fabric omogenea con vuoti poco evidenti, in cui è possibile distinguere la presenza di coccoliti (diametro < 5 μ) o agglomerati di particelle molto piccole.

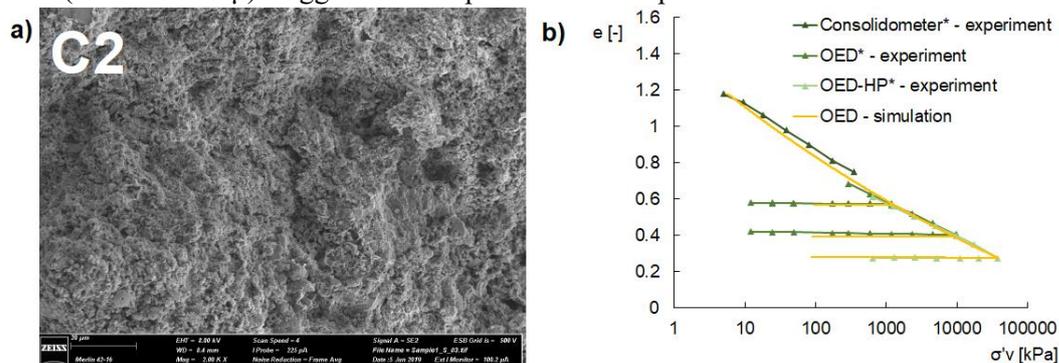


Fig 1. a) Immagine SEM x2000 su roccia naturale (Mifsud, 2019); b) prove di compressione monodimensionale su ricostituito: dati sperimentali (Mifsud, 2019) e simulazione.

In termini di sperimentazione meccanica, i provini di roccia intatta sono stati sottoposti a compressione sia edometrica sia isotropa, mentre il materiale ricostituito è stato sottoposto solo a compressione monodimensionale ad alte pressioni e a compressione isotropa fino ad un massimo di 2300 kPa nella fase che precede il taglio nell'apparecchio triassiale. Il provino ricostituito ha indice dei vuoti iniziale e pari a 1.457, ed è stato sottoposto ad una sequenza di carichi verticali nel consolidometro a partire da 5 kPa fino a 355 kPa. Al termine della fase di consolidazione, una serie di provini sono stati ricavati per eseguire prove edometriche convenzionali e prove edometriche ad alte pressioni. La Figura 1b mostra i risultati delle tre consolidazioni monodimensionali nel piano σ'_v - e . Al termine della fase nel consolidometro, è stato misurato un indice dei vuoti maggiore rispetto a quello

misurato all’inizio della prova edometrica, probabilmente a causa di una distribuzione irregolare del contenuto d’acqua all’interno del materiale posto nel consolidometro, di cui il provino utilizzato nell’edometro rappresenta solo una piccola porzione. Inoltre, un intervallo di circa 82 giorni è intercorso tra il termine della fase nel consolidometro e l’inizio delle prove edometriche.

Campioni indisturbati sono stati utilizzati per eseguire due set di prove edometriche ed una prova di compressione isotropa ad alte pressioni. L’apparecchio edometrico consentiva la misurazione della tensione orizzontale e quindi di calcolare la pressione media efficace. La prova di compressione isotropa è stata eseguita fino al raggiungimento di 60 MPa. Riportando l’andamento dell’indice dei vuoti in funzione sia della pressione media efficace sia della tensione verticale (Fig. 2), insieme alla corrispondente curva di compressione del materiale ricostituito, si può quantificare il grado di struttura del materiale naturale, dato che tutti i percorsi di stato del naturale oltrepassano la curva del ricostituito. Il comportamento iniziale è marcatamente rigido fino al raggiungimento del “grande snervamento” (Hight *et al.*, 1992; Cotecchia e Chandler, 1997), cui segue una netta variazione di pendenza, diversa per le due compressioni. Il materiale appare essere maggiormente suscettibile di danneggiamento microstrutturale in compressione isotropa, durante la quale i processi di destrutturazione sembrano essere più rapidi rispetto alla compressione monodimensionale, quantomeno nell’intervallo tensionale indagato. Inoltre, l’assenza di gradini di carico intermedi nell’intervallo tra 17 e 37 MPa rende problematica una definizione più accurata del grande snervamento (Mifsud, 2019). La ridotta distanza tra la curva di compressione isotropa e quella edometrica del materiale naturale è indicativa di un materiale fortemente diagenizzato, in accordo con quanto osservato da Cotecchia *et al.* (2007) nelle argille azzurre subappennine. Tale distanza, a parità di indice dei vuoti, risultava infatti essere massima per le argille ricostituite e minima per le argille con struttura naturale non degradata da *weathering*.

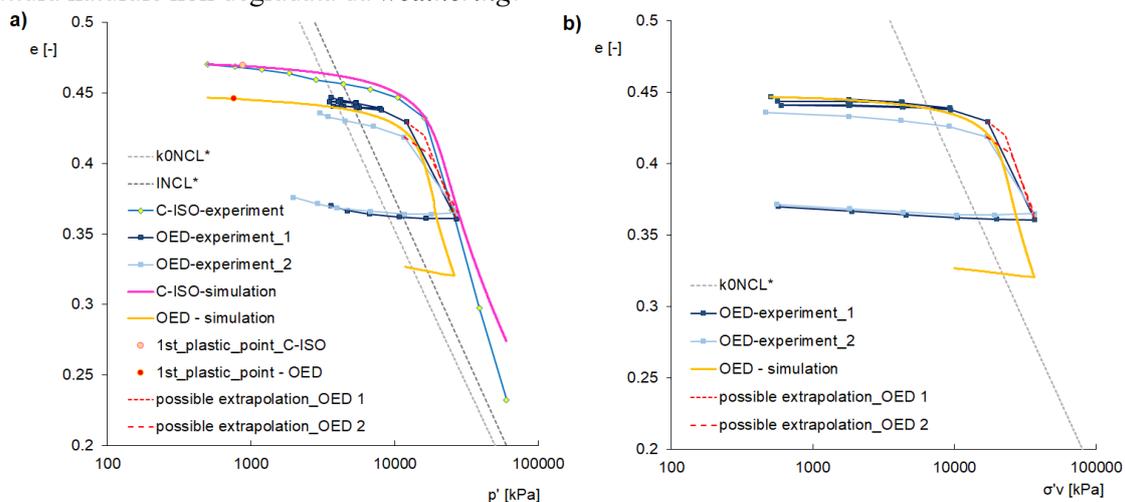


Fig 2. Prove di compressione isotropa ed edometrica su materiale naturale in funzione a) della pressione media efficace e b) della tensione verticale efficace: prove sperimentali (Mifsud, 2019) e simulazioni.

3. Descrizione del modello costitutivo

Il modello multi-superficie ad incrudimento misto isotropo-cinematico proposto da Rouainia e Muir Wood (2000) è caratterizzato da tre superfici nello spazio generale delle tensioni, la cui rappresentazione nel piano $p'-q$ è mostrata in Figura 3. La superficie più esterna contiene informazioni circa la struttura, rappresentata dalla dimensione del semiasse maggiore rp_c , e l’eventuale anisotropia del materiale allo stato naturale, espressa dal parametro η_0 . Come conseguenza dello sviluppo di deformazioni elasto-plastiche, la superficie di struttura tende a ridursi e a convergere verso quella di riferimento, che rappresenta il comportamento del materiale ricostituito. La superficie di riferimento passa per l’origine degli assi, è centrata sull’asse isotropo ed è caratterizzata da un semiasse maggiore pari a p_c . La superficie più piccola, infine, racchiude il dominio delle deformazioni puramente

elastiche, con semiasse maggiore pari a Rp_c , e si muove all'interno della superficie di struttura secondo una legge di incrudimento cinematico. In campo elastico, κ^* rappresenta la pendenza della curva di scarico e ricarico del materiale ricostituito nel piano bi-logaritmico $\ln p' - \ln v$ (Butterfield, 1979) e viene utilizzato per calcolare il modulo di rigidità volumetrica secondo la classica legge ipoplastica di Cam-Clay Modificato (Roscoe e Burland, 1968). Il parametro λ^* si riferisce anch'esso al materiale ricostituito e corrisponde alla pendenza della curva di compressione nel piano $\ln p' - \ln v$. Quando il percorso di carico tocca la superficie di snervamento, le deformazioni diventano elasto-plastiche e la bolla viene trascinata per i successivi incrementi di carico, garantendo la condizione che lo stato tensionale corrente appartenga sempre alla superficie di snervamento o sia al suo interno. Le deformazioni plastiche sono calcolate, considerando una legge di flusso associato, in funzione di un modulo plastico che consta di due contributi: il primo dipende dalla distanza tra lo stato tensionale corrente e il suo punto coniugato appartenente alla superficie di struttura, il secondo è determinato imponendo la legge di consistenza quando la bolla e la superficie di struttura sono in contatto. Il primo contributo dipende da due parametri, ψ e B : ψ è l'esponente del rapporto tra la distanza tra lo stato tensionale corrente e il punto coniugato e la massima distanza possibile, mentre B è un coefficiente moltiplicativo di questo rapporto. Il modello è caratterizzato sia da una legge di incrudimento isotropo che descrive la variazione della dimensione delle tre superfici in funzione delle deformazioni volumetriche plastiche, sia da una legge di destrutturazione che descrive la progressiva riduzione del fattore di struttura e , quindi, della dimensione della superficie di struttura rispetto a quella di riferimento. Quest'ultima legge è controllata da k , velocità di destrutturazione, e A che controlla il contributo alla destrutturazione delle deformazioni volumetriche e deviatoriche plastiche.

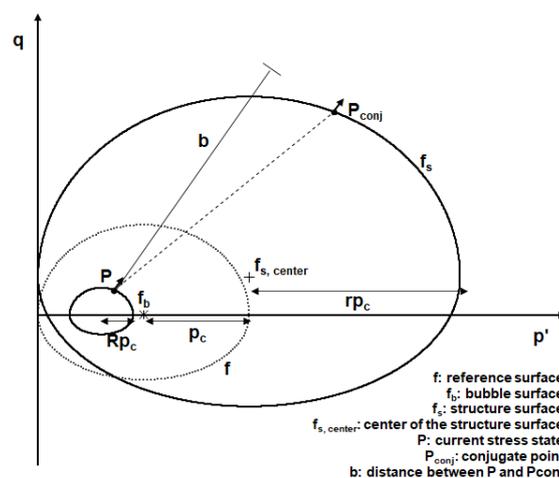


Fig 3. Modello multi-superficie ad incrudimento misto isotropo-cinematico di Rouania e Muir Wood (2000).

4. Calibrazione del modello costitutivo

Per la simulazione delle prove di compressione occorre considerare due stati tensionali iniziali differenti ed un diverso indice dei vuoti iniziale a seconda che siano effettuate per riprodurre il comportamento del materiale ricostituito o naturale.

Per quanto riguarda il materiale ricostituito, il parametro r del modello è posto pari a 1 mentre i parametri η_0 , A e k , strettamente legati alla struttura, non hanno alcuna influenza. Lo stato tensionale iniziale è stato scelto considerando che la prova nel consolidometro parte da una tensione verticale di 5 kPa ed un indice dei vuoti iniziale di 1.1762. Ogni incremento di carico segue un percorso elasto-plastico lungo la curva di compressione, la cui pendenza nel piano $\ln p' - \ln v$ dipende dal valore assunto per λ^* , mentre la pendenza lungo i rami di scarico e ricarico è funzione di κ^* . Il coefficiente di Poisson è pari a 0.15. Il valore di p_c è stato scelto pari a 2.5 kPa, cui corrisponde un valore iniziale di 5 kPa dell'asse maggiore della superficie di riferimento. La bolla è caratterizzata da un valore del parametro R pari a 0.2, al fine di simulare l'esistenza di un dominio elastico sufficientemente piccolo. Il rapporto

di sforzo a stato critico M è pari a 1.388, così come ricavato dai risultati delle prove triassiali eseguite sugli stessi campioni, che qui non si mostrano. Il risultato della simulazione della prova di compressione edometrica su materiale ricostituito è in ottimo accordo con i dati sperimentali (Fig. 1b). Nel caso della roccia intatta, il valore della maggior parte dei parametri è stato mantenuto uguale a quanto scelto per il ricostituito, ad eccezione di quelli legati alla struttura iniziale del materiale ed al successivo fenomeno di destrutturazione. In particolare, p_c è stato posto pari a 2201 kPa, come ricavato dall'intersezione tra la INCL* e la curva di compressione isotropa. Il grande snervamento è stato identificato a 16.23 MPa, cui corrisponde un r pari a 3.68. Lo stato tensionale iniziale parte da una condizione isotropa di 500 kPa ed un indice dei vuoti di 0.4703. La bolla è stata posizionata in modo tale che lo stato tensionale iniziale sia al suo interno e che questa passi per l'origine degli assi del piano $p'-q$.

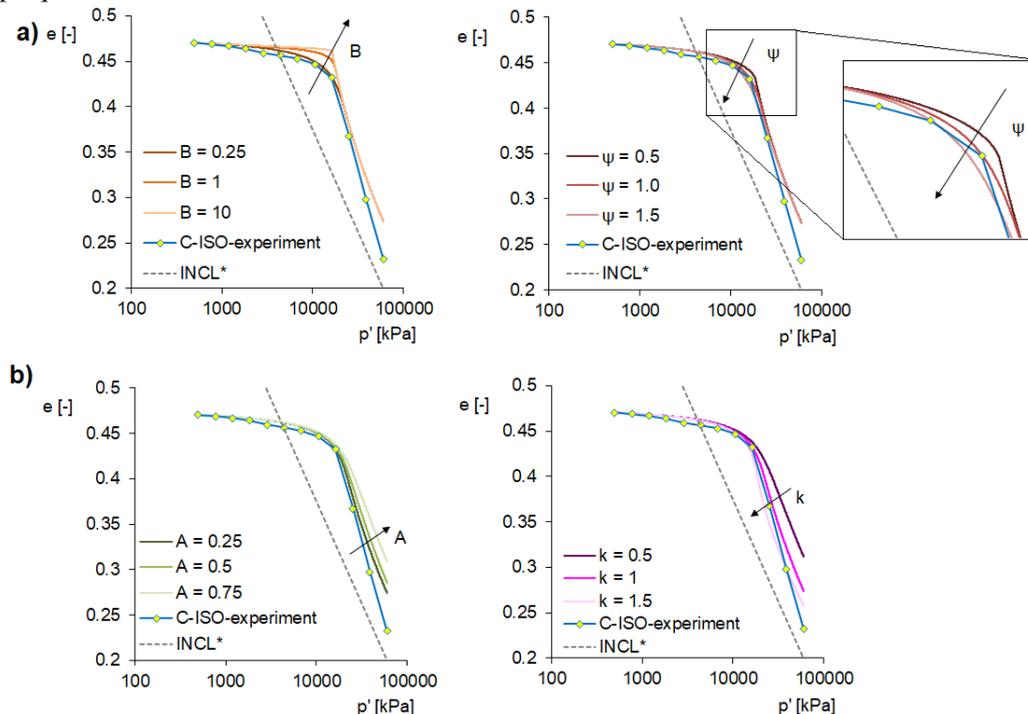


Fig 4. Studio di sensitività a) dei parametri B e ψ ; b) dei parametri A e k .

Per quanto riguarda B , ψ , A e k , un'analisi di sensitività ha permesso di calibrare i loro valori. B e ψ agiscono sul tratto che precede il grande snervamento, cioè nel percorso che porta la bolla verso la superficie di struttura. In questa fase le deformazioni elasto-plastiche cominciano ad accumularsi, ma non sono tali da determinare una importante destrutturazione. Dal confronto parametrico con i dati della prova di compressione isotropa, per B e ψ sono stati scelti, rispettivamente, i valori di 0.25 e 1 (Fig. 4a). Dopo il grande snervamento, le deformazioni plastiche aumentano a causa di una riduzione del modulo plastico e , conseguentemente, il fattore di struttura r si riduce. Poiché i dati di laboratorio mostrano che il materiale subisce una più rapida destrutturazione in compressione isotropa, il valore del coefficiente A è stato posto pari a 0.25, dando così più enfasi al contributo delle deformazioni volumetriche plastiche al processo di destrutturazione durante le simulazioni numeriche. L'analisi parametrica ha, inoltre, consentito di individuare un valore del parametro k pari a 1 per la simulazione della prova di compressione isotropa (Fig. 4b). La stessa procedura di inizializzazione delle variabili interne e gli stessi valori dei parametri del modello adottati per la compressione isotropa sono stati utilizzati per la simulazione delle prove edometriche eseguite sui campioni di roccia intatta.

5. Simulazione delle prove di compressione e discussione dei risultati

La Figura 2a riporta i risultati delle simulazioni numeriche di tutte le prove di compressione a

confronto con i dati sperimentali, mentre la Figura 2b mostra solo il confronto per le prove edometriche nel piano σ'_v - e . Dopo un breve tratto puramente elastico, la rigidità diminuisce gradualmente fino al punto di grande snervamento, colto in maniera ottimale nel caso della compressione isotropa e leggermente sottostimato nella prova edometrica. Possibili cause potrebbero essere ricercate nella forma ellittica della superficie di struttura del modello e nell'aver assunto la stessa velocità di destrutturazione durante la compressione isotropa e quella edometrica. Nel caso della simulazione della compressione isotropa, il modello riesce a cogliere il dato sperimentale dopo il grande snervamento, ma la destrutturazione ad altissime pressioni viene contrastata dall'incrudimento volumetrico positivo e , dunque, risulta meno rapida di quella osservata sperimentalmente. Nel caso delle prove edometriche, l'andamento simulato dal modello è parallelo a quello ottenuto per la compressione isotropa e si pone a sinistra dello stesso, a differenza dei risultati sperimentali che mostrano una quasi coincidenza tra le curve di compressione oltre il grande snervamento. Di conseguenza, in corrispondenza della pressione media efficace massima raggiunta, il modello prevede una maggiore riduzione dell'indice dei vuoti.

Ulteriori sviluppi di questa ricerca prevedono l'uso del modello costitutivo così calibrato per la simulazione di prove triassiali drenate e non drenate eseguite sullo stesso materiale, ricostituito e naturale, e di prove analoghe eseguite in laboratorio su campioni di roccia tenera provenienti da un altro sito, poco distante, e appartenenti alla zona litologica B e C.

Bibliografia

- Adachi T, Oka F (1995). An elasto-plastic constitutive model for soft rock with strain softening, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 19(4), 233-247.
- Boldini D, Palmieri F, Amorosi A (2019). A new versatile constitutive law for modelling the monotonic response of soft rocks and structured fine-grained soils, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 43(15), 2383-2406.
- Anagnostopoulos AG, Kalteziotis N, Tsiambaos GK, Kavvas M (1991). Geotechnical properties of the Corinth Canal marls, *Geotechnical & Geological Engineering*, 9(1), 1-26.
- Bosellini A, Mutti E, Ricci Lucchi F (1989). *Scienza della terra. Rocce e successioni sedimentarie*, UTET.
- Burland JB (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays, *Géotechnique*, 40(3), 329-378.
- Cotecchia F, Chandler. RJ (1997). The influence of structure on the pre-failure behaviour of a natural clay, *Géotechnique*, 47(3), 523-544.
- Cotecchia F, Cafaro F, Aresta B (2007). Structure and mechanical response of sub-Apennine Blue Clays in relation to their geological and recent loading history, *Géotechnique*, 57(2), 167-180.
- Fookes PG, Higginbottom IE (1975). The classification and description of near-shore carbonate sediments for engineering purposes, *Géotechnique*, 25(2), 406-411.
- Gens A, Nova R (1993). Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks, *Geotechnical engineering of hard soils-soft rocks*, 485-494.
- Hight DW, Bond AJ, Legge JD (1992). Characterization of the Bothkennar clay: an overview. *Géotechnique* 42, 303-347.
- Leroueil S, Vaughan PR (1990). The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks, *Géotechnique*, 40(3), 467-488.
- Mifsud A (2019). The Middle Globigerina Limestone at Mrieħel, Malta. A study into the geotechnical characteristics with reference to engineering situations, Ph.D. Thesis. University of Malta.
- Pellegrino A (1970). Mechanical behaviour of soft rocks under high stresses, *Proc. Int. Soc. Rock Mech.*, 1, 1-19.
- Razoaki RN (2000). Effect of ageing on mechanics of chalk slurries, Ph.D. Thesis. University of Portsmouth.
- Roscoe KH, Burland JB (1968). On the generalized stress-strain behaviour of "wet" clay, *Engineering plasticity*, Cambridge University Press, 535-609.
- Rouainia M, Muir Wood D (2000). A kinematic hardening constitutive model for natural clays with loss of structure, *Géotechnique*, 50(2), 153-164.
- Schofield A, Wroth P (1968). *Critical state soil mechanics*, London: McGraw-Hill.