

IMPLEMENTAZIONE E VALIDAZIONE DI UN MODELLO COSTITUTIVO AVANZATO PER LE SABBIE IN OPENSEES

Tony Fierro

Università degli Studi del Molise
tony.fierro@unimol.it

Davide Noè Gorini

Sapienza Università di Roma
davideno.gorini@uniroma.it

Massimina Castiglia

Università degli Studi del Molise
massimina.castiglia@unimol.it

Filippo Santucci de Magistris

Università degli Studi del Molise
filippo.santucci@unimol.it

Sommario

La descrizione del comportamento meccanico delle sabbie sature soggette a carichi ciclici rappresenta un argomento di rilievo nell'ambito della risposta sismica delle terre, con particolare attenzione alla possibile occorrenza del fenomeno della liquefazione. Negli anni, sono stati sviluppati diversi modelli costitutivi per descrivere la risposta tenso-deformativa dei terreni in condizioni sismiche, ma solo una parte di questi è attualmente integrata in codici di calcolo. Con il fine di ampliare il panorama dei modelli avanzati di questo tipo utilizzando un ambiente numerico *open-source*, la nota vuole mostrare l'implementazione, la verifica e la validazione del legame costitutivo sviluppato da Papadimitriou e Bouckovalas (2002) in OpenSEES. Il modello simula caratteristiche distintive della risposta in condizioni cicliche da piccoli a grandi livelli di deformazione: una formulazione para-elastica per piccole deformazioni e un indice empirico che consente di riprodurre l'effetto del tensore di tessitura sul modulo plastico. L'affidabilità dell'implementazione è verificata con successo su prove di laboratorio, drenate e non drenate, monotone e cicliche.

1. Introduzione

Molteplici sono le evidenze di eventi sismici passati in cui il fenomeno della liquefazione ha causato importanti danni strutturali, sia in fondazione che nella struttura in elevazione, causando, a volte, anche il collasso dell'opera. Di conseguenza, negli anni si sono susseguiti numerosi studi col fine di sviluppare una chiara comprensione del fenomeno, per una valutazione realistica del danno strutturale e quindi per una progettazione più affidabile. A questo proposito, sono stati sviluppati modelli costitutivi rivolti alla descrizione del comportamento tenso-deformativo dei terreni a grana grossa saturi secondo diverse strutture analitiche. Tra queste, la plasticità *bounding surface* si è rivelata particolarmente efficiente, sia in virtù dell'eleganza della formulazione che della capacità di simulare l'evoluzione della risposta inelastica e l'insorgere della liquefazione.

In quest'ambito, la presente nota descrive l'implementazione, la verifica e la validazione del modello costitutivo *bounding surface* sviluppato da Papadimitriou e Bouckovalas (2002). L'ambiente numerico di riferimento è OpenSEES (McKenna et al. 2010), piattaforma *open-source* in continuo sviluppo per valutazioni avanzate della risposta sismica di sistemi terreno-struttura.

2. Il modello costitutivo di Papadimitriou e Bouckovalas (2002)

Il modello di Papadimitriou e Bouckovalas (2002), denominato NTUASand02, rappresenta un'evoluzione del modello elasto-plastico di tipo *bounding surface* proposto da Manzari e Dafalias (1997) ed è la generalizzazione multi-assiale del modello sviluppato da Papadimitriou et al. (2001). Nel seguito verranno richiamati gli aspetti cardine della formulazione, mentre una descrizione completa è fornita in Papadimitriou e Bouckovalas (2002).

Lo stato del materiale è definito dal parametro di stato $\psi = e - e_{cs}$ (Been e Jeffries, 1985). La risposta elasto-plastica incrudente si sviluppa a partire dal raggiungimento dello stato tensionale della superficie di plasticizzazione interna, che racchiude il nucleo elastico, ed è funzione della distanza dello stato tensionale corrente da tre superfici: di dilatanza, di stato critico e di *bounding*, mostrate in Fig. 1. Ogni superficie è descritta da un cono con il vertice nell'origine degli assi nel piano degli invarianti p' - q (Fig. 1a); l'intersezione tra queste superfici e il piano π è riportata in Fig.1b, considerando le tensioni deviatoriche s_i normalizzate rispetto la pressione media efficace.

La superficie di snervamento, invece, è rappresentata da un cerchio con ampiezza controllata dal parametro costitutivo m , e orientazione rispetto l'asse idrostatico definita dal tensore α , che rappresenta il *back-stress*. Eccetto la superficie di stato critico che rimane invariata nello spazio delle tensioni, il modello prevede un incrudimento cinematico delle altre superfici, come caratteristica fondamentale per descrivere il comportamento ciclico delle terre. Di conseguenza, il parametro m è una costante, mentre α evolve quando si sviluppano deformazioni plastiche. Queste ultime rappresentano le variabili interne del modello e sono il risultato di una legge di flusso non-associata.

Le dimensioni delle superfici di dilatanza, di stato critico e di *bounding* dipendono dal parametro di stato ψ , mentre la loro forma è legata all'angolo di Lode θ sulla base della legge di mappatura.

Un altro aspetto che contraddistingue il modello è la definizione di un parametro scalare h_f che moltiplica direttamente il modulo plastico, per considerare l'evoluzione del tensore di tessitura. Infine, il modulo di rigidezza a taglio in campo elastico segue la formulazione non-lineare di Ramberg-Osgood per riprodurre la risposta a bassi livelli deformativi in modo più affidabile.

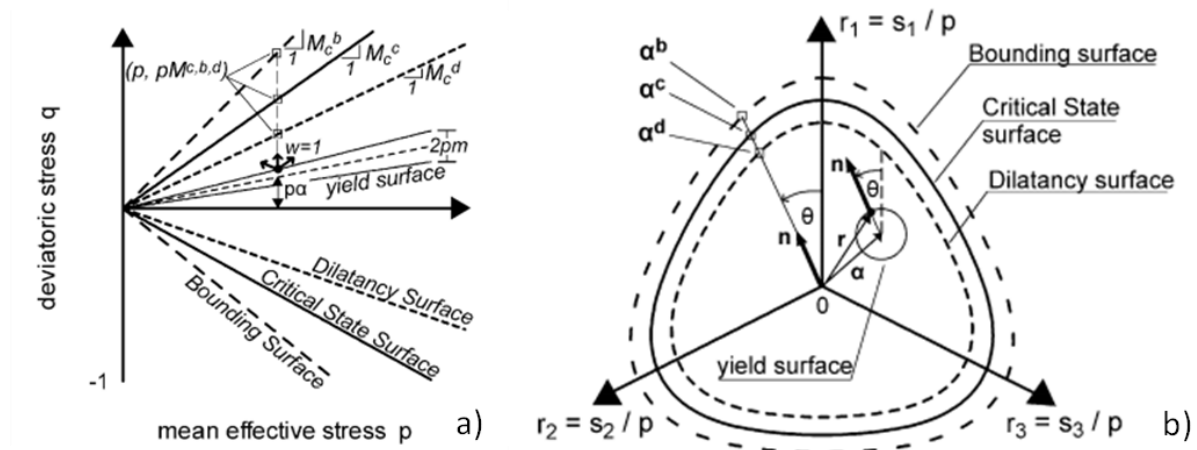


Fig 1. Rappresentazione delle superfici del modello (a) nel piano p' - q e (b) nel piano π (riprodotto da Papadimitriou e Bouckovalas, 2002).

3. Implementazione in OpenSEES

Il modello NTUASand02 è stato implementato in OpenSEES come un nuovo materiale multi-assiale. Il codice sorgente è composto da un file di apertura, che contiene le generalità del modello, e da un file principale in cui viene sviluppata la risposta costitutiva.

Il file principale contiene metodi utili alla definizione dello stato corrente del materiale e quelli che

descrivono la risposta non-lineare. Rispetto a quelli già presenti nella libreria, sono stati implementati alcuni metodi aggiuntivi per il calcolo del parametro di stato, dell'angolo di Lode e dei moduli elastici. Sono stati implementati e valutati differenti schemi di integrazione ed è stato selezionato come *default* lo schema di Eulero modificato con correzione del *drift* (Sloan et al., 2001). Il materiale richiede l'assegnazione dei parametri che descrivono la risposta elastica (B , ν , a_1 , γ_1), quelli relativi allo stato critico ($e_{cs,a}$, λ , M_c^e , M_c^e) e i parametri che determinano l'effetto di ψ sulla resistenza di picco (k_c^b) e sulla superficie di dilatanza (k_c^d); vanno inoltre definiti la costante di dilatanza (A_0) e la costante del modulo plastico (h_0), nonché i parametri che descrivono l'evoluzione del tensore di tessitura (H_0 , ζ); infine, vengono specificati il parametro m che definisce l'ampiezza del nucleo elastico, l'indice dei vuoti iniziale e la densità di massa.

Il modello può essere assegnato a elementi quadrilateri o esaedrici, con e senza accoppiamento idromeccanico, sia in analisi statiche che dinamiche. Maggiori dettagli sulle procedure di implementazione del modello sono in Fierro (2022).

4. Verifica del modello

L'implementazione del modello è stata verificata attraverso la simulazione di prove triassiali monotone e cicliche, drenate e non-drenate, e prove di taglio semplice ciclico disponibili in letteratura, condotte nell'ambito del progetto VELACS (Arulmoli et al., 1992) sulla sabbia del Nevada. Le simulazioni delle prove sull'elemento di volume, eseguite in OpenSEES, sono state confrontate con i dati sperimentali e con simulazioni numeriche di precedenti studi di letteratura. I parametri costitutivi adottati fanno riferimento alla calibrazione proposta da Papadimitriou e Bouckovalas (2002).

4.1 Simulazione di prove triassiali monotone drenate

Cominciando dalla risposta in condizioni di carico monotone, sono stati confrontati i risultati ottenuti dalla simulazione di due prove triassiali drenate. Le prove sono state eseguite con una pressione di confinamento di 80 kPa su un campione di sabbia del Nevada con densità relativa pari a $D_r = 40\%$, 60% . In OpenSEES, è stato adottato un elemento esaedrico con singolo punto di integrazione. Le relazioni tra la deformazione volumetrica e quella assiale simulate in OpenSEES sono riportate in Fig. 2a, mentre il dato sperimentale e le simulazioni eseguite da Andrianopoulos et al. (2010) in FLAC, considerando una versione modificata del modello, sono riportati in Fig. 2b: si osserva in generale un buon accordo, sebbene, entrambe le simulazioni numeriche producono delle deformazioni volumetriche leggermente differenti rispetto a quelle misurate.

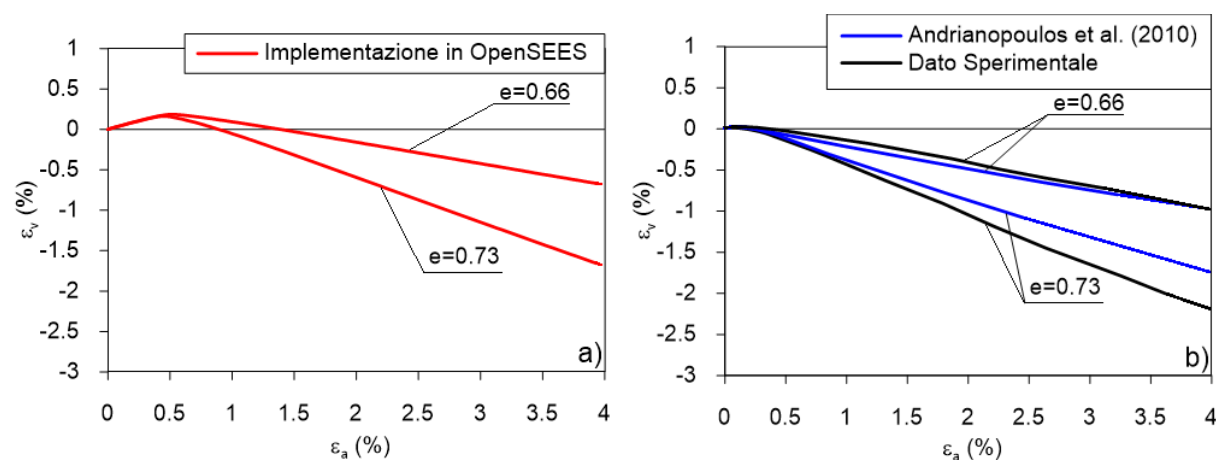


Fig. 2. Prove triassiali monotone drenate: (a) implementazione in OpenSEES, (b) andamenti sperimentali e simulazioni numeriche effettuate da Andrianopoulos et al. (2010).

4.2 Simulazione di prove triassiali monotone non drenate

Successivamente, sono state simulate prove triassiali monotone non drenate eseguite su un campione di sabbia del Nevada con indice dei vuoti iniziale pari a 0.66 a diverse pressioni di confinamento, 40-160 kPa. Si è adottato un elemento esaedrico con accoppiamento idro-meccanico a singolo punto di integrazione (elemento *SSPbrickUP* in OpenSEES). Le risposte in termini di tensione deviatorica e deformazione assiale sono mostrate in Fig. 3. Le prove monotone non drenate mostrano una buona sovrapposizione tra i risultati ottenuti con la presente implementazione in OpenSEES e quelli ottenuti da Miriano (2010) con l'implementazione in Abaqus e Papadimitriou et al. (2001).

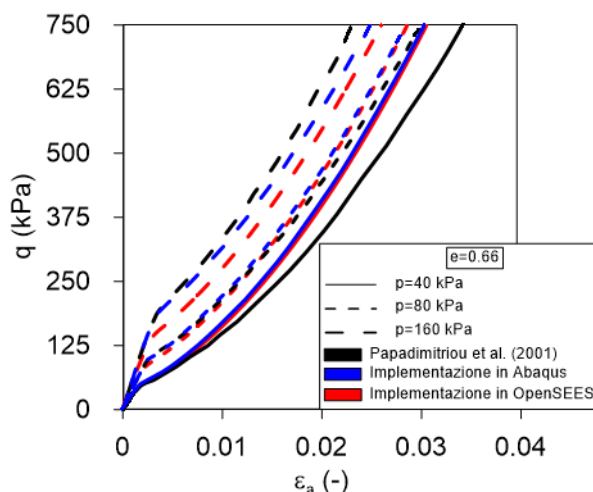


Fig. 3. Confronto tra le simulazioni di una prova triassiale monotona non drenata ottenute da Papadimitriou et al. (2001; curva nera), Miriano (2010, curva blu), e mediante l'implementazione in OpenSEES (curva rossa).

4.3 Prove di taglio semplice ciclico in condizioni non drenate

Analogamente a quanto fatto nel progetto VELACS, la prova di taglio semplice ciclico a controllo di carico adottata per validare l'implementazione del modello è stata condotta su un provino di terreno di sabbia del Nevada con un indice dei vuoti iniziale di 0.66 ($D_r=60\%$).

La fase di consolidazione drenata prevede una condizione di carico anisotropa, con applicazione di una tensione efficace di confinamento pari a 160 kPa e una tensione tangenziale pari a $\tau=5.9$ kPa. Nella successiva fase di taglio ciclico, l'ampiezza della tensione tangenziale applicata è pari a 13.7 kPa. La prova è stata riprodotta in ambiente OpenSEES, adottando elementi quadrilateri con accoppiamento idro-meccanico (elemento *quadUP*) e le risultanti curve $\tau-\sigma_y'$ e $\tau-\gamma$ (σ_y' =tensione verticale efficace, γ =deformazione di taglio) sono confrontate in Fig. 4 con le simulazioni numeriche eseguite da Papadimitriou e Bouckovalas (2002) e Miriano (2010) in Abaqus. I risultati dell'implementazione in OpenSees (curve rosse) sono in buon accordo con quelle dell'implementazione originale (curve nere). In particolare, i cicli isteretici mostrano una forma e un'ampiezza molto simili, con marginali differenze probabilmente associate alle diverse piattaforme numeriche adottate. Tuttavia, una migliore prestazione la si osserva rispetto alle simulazioni di Miriano (2010).

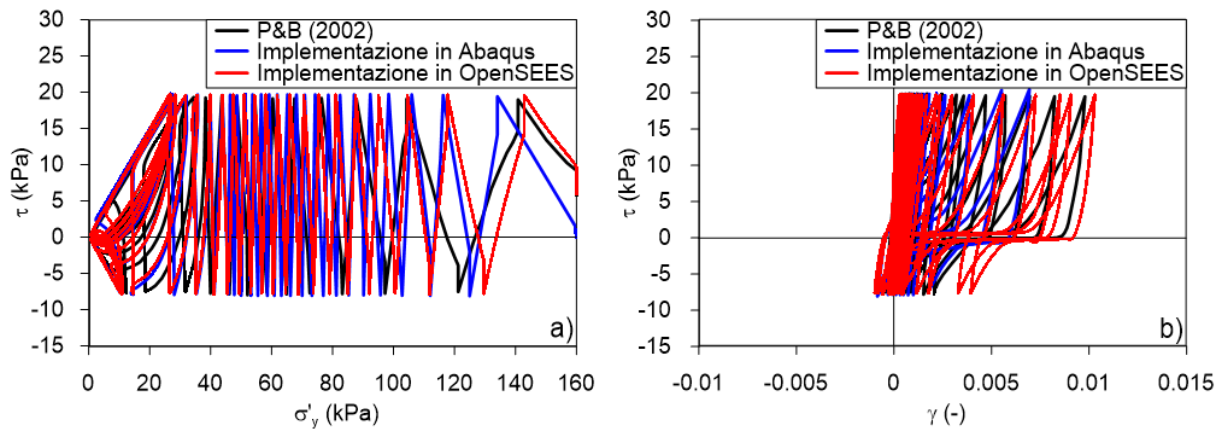


Fig 4. (a) Percorsi tensionali e (b) cicli isteretici ottenuti da Papadimitriou e Bouckovalas (2002; curve nere), Miriano (2010; curve blu), e implementazione in OpenSEES (curve rosse).

4.4 Prove triassiali cicliche in condizioni non drenate

La prova triassiale ciclica qui simulata è stata eseguita su un campione di sabbia del Nevada con un indice dei vuoti iniziale di 0.73 ($D_r=40\%$). L'elemento di volume è stato simulato con un singolo elemento finito esaedrico con accoppiamento idro-meccanico (elemento *brickUP* in OpenSEES). Il processo di carico consiste in una fase di consolidazione anisotropa applicando una pressione media efficace $p'=80$ kPa e una tensione deviatorica $q=26$ kPa, seguita da un carico deviatorico ciclico di ampiezza pari a 43.1 kPa. I percorsi tensionali e i cicli isteretici ottenuti mediante la simulazione in OpenSEES sono confrontati in Fig. 5 con le simulazioni di Papadimitriou e Bouckovalas (2002), mentre nella Fig. 6 sono rappresentati insieme ai dati sperimentali. L'accordo tra le due implementazioni è soddisfacente. Tuttavia, il confronto con il dato sperimentale, utilizzando la calibrazione proposta in Papadimitriou e Bouckovalas (2002), non riproduce adeguatamente la risposta a bassi livelli deformativi.

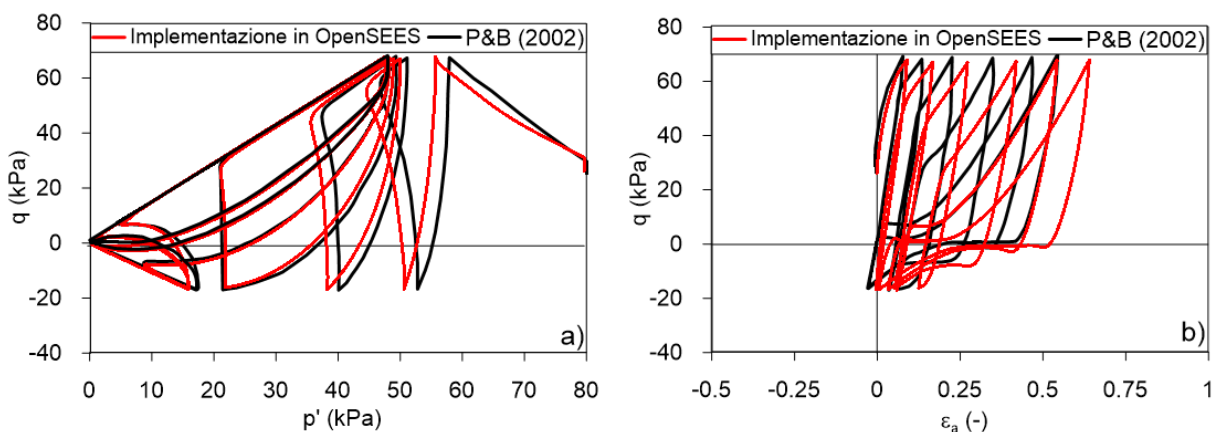


Fig 5. (a) Percorsi tensionali nel piano degli invarianti p' - q e (b) relazione tensione deviatorica-deformazione assiale ottenute da Papadimitriou e Bouckovalas (2002; curva nera) e mediante l'implementazione in OpenSEES (curva rossa).

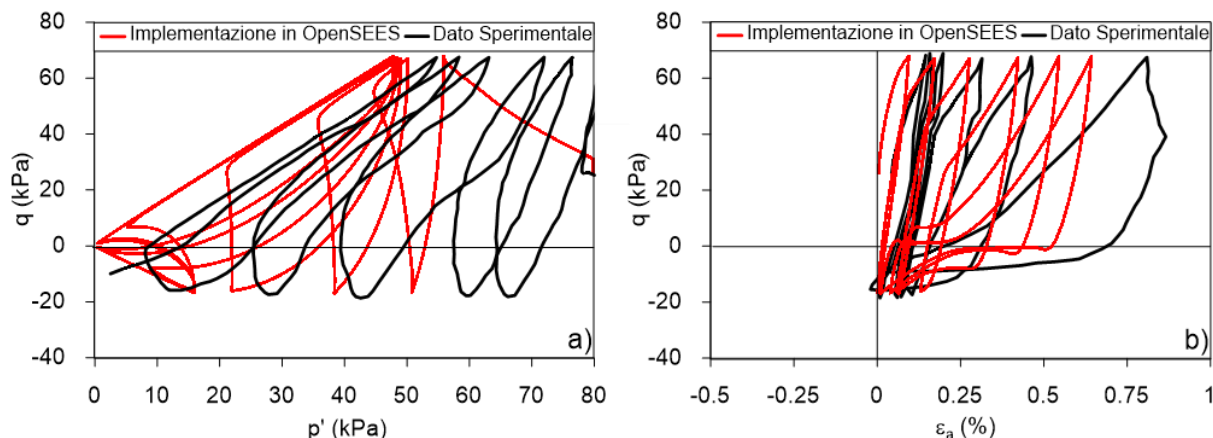


Fig 6. (a) Percorsi tensionali nel piano degli invarianti p' - q e (b) relazione tensione deviatorica-deformazione assiale ottenuti sperimentalmente (Arulmoli et al., 1992; curva nera) e mediante l'implementazione in OpenSEES (curva rossa).

5. Conclusioni

Nella presente nota è stata sinteticamente illustrata la validazione dell'implementazione del modello costitutivo di Papadimitriou e Bouckovalas (2002), NTUASand02, in OpenSEES.

È stato osservato un buon accordo tra i risultati ottenuti dalle simulazioni in OpenSEES, dalle simulazioni numeriche precedenti su diverse piattaforme e dalle prove di laboratorio sull'elemento di volume. Tuttavia, si è visto come la risposta costitutiva a livelli di deformazione contenuti tenda a sovrastimare lo sviluppo delle deformazioni volumetriche, in condizioni drenate, e delle sovrappressioni interstiziali, in condizioni non drenate.

Quindi, il modello è stato verificato con successo, ma alcuni aspetti relativi alla formulazione sono attualmente in una fase di ulteriore sviluppo per migliorare la previsione del comportamento in condizioni cicliche distanti dal raggiungimento della liquefazione.

Bibliografia

- Andrianopoulos K.I., Papadimitriou A.G. and Bouckovalas G.D. (2010). Bounding surface plasticity model for the seismic liquefaction analysis of geotechnical structures. *Soil Dyn Earthq Eng* 30(10): 895-911
- Arulmoli K., Muraleetharan K.K., Hossain M.M., Fruth, L.S. (1992). VELACS verification of liquefaction analyses by centrifuge studies Laboratory Testing Program Soil Data Report, Research Rep., The Ea. Tech. Corp.
- Been K., Jefferies M. G. (1985). A state parameter for sands, *Geotechnique*, London, 35(2), 99–112.
- Fierro T. (2022). Implementation and use of advanced constitutive models in numerical codes for the evaluation of the soil response under seismic loadings. Ph.D. Thesis, University of Molise.
- Manzari M.T., Dafalias Y.F. (1997). A critical state two-surface plasticity model for sand, *Geotechnique* 47(2):255–72.
- McKenna, F., Scott, M. H., Fenves, G. L. (2010). OpenSees. Nonlinear finite-element analysis software architecture using object composition, *Journal of Computing in Civil Engineering* 24(1), 95–107.
- Miriano C. (2010). Numerical modelling of the seismic response of flexible retaining structures. Ph.D. Thesis, Sapienza University of Rome
- Papadimitriou A.G., Bouckovalas G.D. (2002). Plasticity model for sand under small and large cyclic strains: a multiaxial formulation, *Soil Dyn and Earthq Eng* 22:191–204.
- Papadimitriou A.G., Bouckovalas G.D., Dafalias Y.F. (2001). Plasticity model for sand under small and large cyclic strains, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE* 127(11):973–83.
- Sloan S.W., Abbo A.J., Sheng D. (2001). Refined explicit integration of elastoplastic models with automatic error control, *Engineering Computations*.18:121–54