



ANALISI DINAMICHE IN TENSIONI EFFICACI CON IL CODICE ‘SCOSSA’

Anna Chiaradonna

Università degli Studi di Napoli Federico II

anna.chiaradonna@unina.it

Giuseppe Tropeano

Università degli Studi di Cagliari

giuseppe.tropeano@unica.it

Anna d’Onofrio

Università degli Studi di Napoli Federico II

donofrio@unina.i

Francesco Silvestri

Università degli Studi di Napoli Federico II

francesco.silvestri@unina.it

Sommario

L’incremento di pressioni interstiziali indotto da azioni sismiche in depositi sabbio-limosi determina la progressiva riduzione delle tensioni efficaci e di conseguenza della rigidità e della resistenza dei terreni, fino a condurre alla completa liquefazione. Un metodo sviluppato per la stima di tale incremento si basa su un parametro semi-empirico, detto ‘parametro di danno’, che consente di applicare direttamente i risultati di prove cicliche di laboratorio per predire l’incremento di pressione interstiziale generato in sito dall’azione sismica. Tale procedura, implementata all’interno di un codice di calcolo non lineare, consente di effettuare analisi monodimensionali in tensioni efficaci senza adottare sofisticati modelli costitutivi del terreno. L’applicazione ad un argine danneggiato dal terremoto emiliano del 2012 ha consentito di evidenziare fenomeni di degradazione ciclica degli strati sabbiosi profondi che non sarebbe stato possibile osservare con le tradizionali analisi in tensioni totali.

1. Introduzione

Durante i recenti eventi sismici del maggio 2012 occorsi in Emilia Romagna, sono stati osservati diffusi fenomeni di liquefazione in diversi siti (Fioravante et al., 2013). L’estensione e l’intensità di tali effetti pone l’attenzione sui metodi per l’analisi del rischio di liquefazione di depositi di terreni granulari.

Il modello semplificato di seguito proposto è basato sulla rappresentazione dei dati di sovrappressione interstiziale ottenuti da prove cicliche triassiali o di taglio semplice mediante una variabile sintetica, il ‘parametro di danno’, che consente l’estensione dell’applicazione dei dati ottenuti sperimentalmente a storie irregolari di tensione o deformazione. La procedura non necessita che le storie irregolari siano approssimate a cicli equivalenti con tensione uniforme e, di conseguenza, può essere applicata, senza variazioni, in metodi di calcolo che operano in tensioni totali o in tensioni efficaci. Di seguito si illustra il metodo semplificato proposto e l’implementazione in un codice di calcolo per l’analisi dinamica non lineare in condizioni monodimensionali, nonché l’applicazione ad un caso di studio.

2. Modello semi-empirico per la previsione dell'incremento di pressione interstiziale

Il metodo semplificato per la previsione dell'accumulo di pressioni interstiziali si basa sui risultati di prove cicliche a tensione controllata. I risultati di tali prove sono in genere espressi come curva $SR - N$, dove SR è il rapporto tra la tensione tangenziale e la tensione efficace media iniziale nelle prove triassiali cicliche, oppure la tensione verticale efficace iniziale nelle prove di taglio semplice - che innesca la liquefazione per un dato numero di cicli, N (Fig. 1a).

La curva di resistenza ciclica può essere analiticamente descritta dalla relazione (Park e Ahn, 2013):

$$\frac{(SR - SR_t)}{(SR_r - SR_t)} = \left(\frac{N_r}{N}\right)^{1/\alpha} \quad (1)$$

in cui N_r e SR_r sono le coordinate di un generico punto sperimentale della curva assunto come riferimento. Il parametro α è la pendenza della relazione di regressione lineare dei punti sperimentali nel piano bi-logaritmico $(SR - SR_t) - N$, mentre il valore di soglia, SR_t , è desumibile dalla stessa relazione, oppure può essere fissato in funzione della soglia di deformazione volumetrica, γ_v , al di sotto della quale non si innesca alcuna sovrappressione interstiziale.

Per costruire la curva di resistenza ciclica si considera il c.d. 'criterio tensionale', che definisce come condizione d'incipiente liquefazione quella in cui l'incremento di pressione interstiziale è pari al 95% della tensione efficace di confinamento iniziale.

I parametri della curva vengono impiegati per il calcolo del parametro di danno, che assume valore diverso da zero quando il rapporto di tensione SR è maggiore del valore soglia, SR_t , definito in precedenza. Con riferimento ad una storia di carico regolare, il parametro di danno risulta proporzionale al numero di cicli di carico, N , applicati:

$$\kappa = 4 N (SR - SR_t)^\alpha \quad (2)$$

Sostituendo nell'equazione (2) l'espressione della curva di resistenza ciclica (1), si ottiene il valore massimo che può assumere il parametro di danno, κ_L , che corrisponde alla condizione di liquefazione definita dalla curva di resistenza ciclica:

$$\kappa_L = 4 N_r (SR_r - SR_t)^\alpha \quad (3)$$

L'espressione (3) include tutte le caratteristiche geometriche della curva di resistenza ciclica (pendenza, asintoto, punto sperimentale) che ne definiscono la posizione all'interno del piano $SR - N$. In tal senso è possibile assimilare il danno a liquefazione, κ_L , ad un parametro sintetico della potenziale liquefacibilità dei terreni. A titolo di esempio, si mostrano in Fig. 1a le curve di resistenza ciclica descritte dall'eq. (1) per un'argilla (Boulanger e Idriss, 2006), una sabbia limosa ed una sabbia con coefficiente di uniformità minore di 3 (Tonni et al., 2015). Il parametro di danno a liquefazione di ciascuna curva è riportato in Tab. 1. Come atteso, il terreno argilloso è caratterizzato dal valore più alto di κ_L , circa 10.000 volte più alto di quello della sabbia. Tale parametro può, quindi, considerarsi una misura della resistenza ciclica dei terreni.

Dal confronto delle equazioni (2) e (3) si osserva inoltre che il rapporto κ/κ_L è proporzionale al rapporto, N/N_L , tra il generico numero di cicli ed il numero di cicli a liquefazione, tradizionalmente impiegato per la rappresentazione dei risultati delle prove cicliche di laboratorio. Ne consegue che le relazioni semi-empiriche proposte in letteratura per esprimere un legame univoco tra il rapporto di sovrappressione interstiziale, r_u , e il numero di cicli (cfr. p.es. Booker et al., 1976) possono essere generalizzate in termini di parametro di danno.

Nello studio in esame è stata assunta una relazione in grado di descrivere diversi andamenti sperimentali (Chiaradonna et al., 2015):

$$r_u = a \left(\frac{\kappa}{\kappa_L} \right)^b + c \left(\frac{\kappa}{\kappa_L} \right)^4 \quad (4)$$

in cui a , b , c sono i coefficienti di regressione della curva r_u-N/N_L , definiti sulla base dei dati sperimentali disponibili (Fig. 1b).

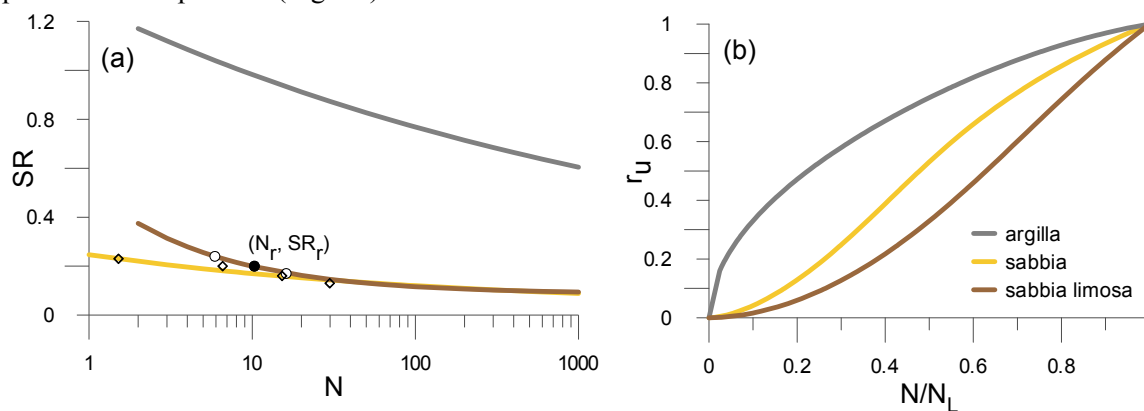


Fig 1. Curve di resistenza ciclica (a) per tre diversi tipi di terreno e relative relazioni r_u-N/N_L (b)

Tab 1. Parametro di danno a liquefazione per i tre diversi tipi di terreno.

Terreno (Unità)	Sabbia (A)	Sabbia limosa (Ar, B)	Argilla (C)
κ_L	0.00135	0.95	17.54

2.1 Implementazione del modello nel codice di calcolo non lineare 'SCOSSA'

Il modello descritto è stato implementato nel codice di calcolo monodimensionale a masse concentrate 'SCOSSA' (Tropeano et al., 2011). La diminuzione di rigidità indotta dalla riduzione dello stato tensionale efficace a seguito dell'accumulo delle pressioni interstiziali è stata simulata mediante l'introduzione del modello di degradazione proposto da Matasovic e Vucetic (1993). In esso la rigidità viene ridotta proporzionalmente al rapporto di sovrappressione interstiziale sviluppato ad ogni istante di tempo. A seguito dell'implementazione del modello, è possibile effettuare con lo stesso codice analisi sia in tensioni efficaci sia in tensioni totali, e verificarne in tal modo l'affidabilità.

3. Applicazione al caso di studio

L'argine di Scortichino, nel comune di Bondeno, è uno dei rilevati arginali che ha subito danni notevoli a seguito della sequenza sismica emiliana del 2012 (Fig. 2). Si tratta di un argine a servizio del canale Diversivo di Burana, lungo le cui sponde si sono localizzati nel tempo diversi nuclei abitativi e qualche impianto produttivo. Fessure longitudinali all'asse del rilevato e instabilità locali delle sponde hanno interessato un tratto di argine di circa 3 km, causando l'inagibilità di diversi edifici situati in cresta (Tonni et al., 2015).

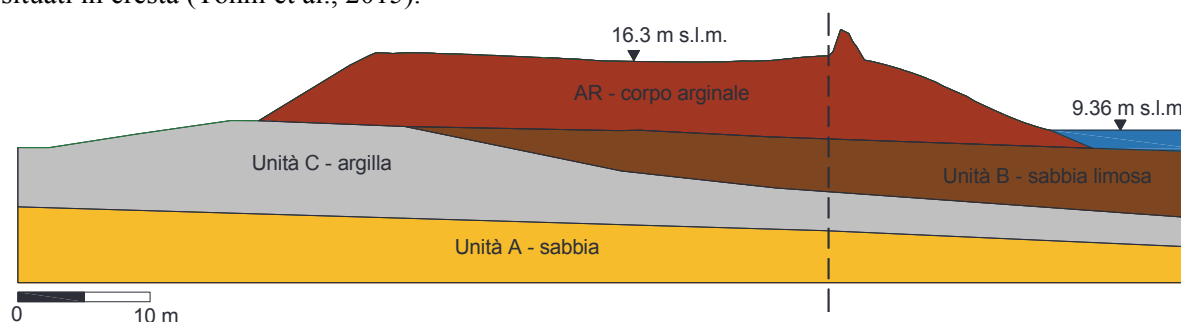


Fig 2. Sezione dell'argine di Scortichino con indicazione delle unità stratigrafiche principali

Dall'ampia campagna di indagini sperimentali è stato possibile sia misurare direttamente con prove Lefranc la conducibilità idraulica dei diversi orizzonti stratigrafici, sia stimarla tramite correlazioni empiriche con le prove CPT (Tonni et al., 2015). Un'analisi di filtrazione con il codice di calcolo SEEP/W (Geostudio, 2007) ha consentito di ricostruire il regime delle pressioni interstiziali all'interno della sezione arginale (Fig. 3), compatibilmente con le misurazioni piezometriche eseguite all'interno delle sabbie profonde. L'elevato grado di saturazione dei campioni indisturbati ($> 95\%$), prelevati a profondità esigua dal piano campagna, ha consentito di sviluppare l'analisi con il solo riferimento alla permeabilità satura dei terreni. Le condizioni al contorno sono costituite dalla quota del pelo libero nel canale e dalla condizione di flusso nullo lungo il perimetro della sezione.

La presenza del canale pensile innesca un moto di filtrazione stazionario all'interno dell'argine, ma lo spesso strato di argilla (unità C) sovrastante le sabbie del Po (unità A) determina di fatto un bacino di accumulo delle acque nello strato delle sabbie limose (unità B).

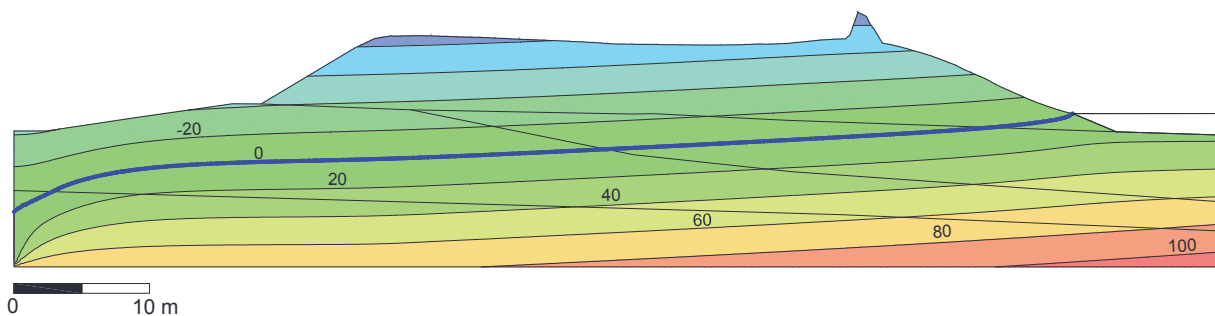


Fig 3. Simulazione del regime delle pressioni interstiziali all'interno della sezione arginale (isobare in kPa)

3.2 Analisi dinamica monodimensionale in tensioni efficaci

La notevole estensione in larghezza del rilevato arginale, associata all'andamento quasi costante del pelo libero della falda all'interno dell'argine rendono significativa l'analisi dinamica di una colonna di terreno localizzata in prossimità del canale (linea nera, Fig. 2). La Fig. 4a rappresenta la stratigrafia assunta per l'analisi ed il relativo profilo di velocità con estensione fino al substrato rigido (Tonni et al., 2015); la Fig. 4b riporta le curve di variazione di rigidità normalizzata e fattore di smorzamento con la deformazione γ , misurate in prove di laboratorio sui diversi materiali (cfr. Tonni et al., 2015).

L'analisi dinamica in tensioni efficaci è stata effettuata integrando le informazioni geotecniche necessarie per effettuare l'analisi in tensioni totali, con i parametri del modello di sovrappressione interstiziale descritto in precedenza (eq. 3 e 4). Per le Unità sabbio-limose Ar-B e A, questi parametri sono stati ricavati dalle prove di taglio semplice ciclico (Tonni et al., 2015). Per l'Unità argillosa C, la curva di resistenza ciclica, non misurata in laboratorio, è stata stimata mediando dati di letteratura su argille di diversa plasticità (Boulanger e Idriss, 2006); il valore di soglia SR_t è stato invece definito a partire dalla deformazione di soglia volumetrica misurata da prove di colonna risonante (Tonni et al., 2015). Per definire la relazione r_u-N/N_L , si è fatto, invece, riferimento ai risultati della prova di taglio semplice ciclico realizzata sul campione dell'unità B con la massima frazione argillosa (Tonni et al., 2015). Si osservi che l'accumulo di pressione interstiziale tende a stabilizzarsi manifestando un comportamento di natura diverso rispetto a quello tipico dei materiali sabbiosi (Fig. 1b).

Al fine di assicurare la coerenza tra la resistenza a liquefazione definita dalla curva di resistenza ciclica e la rigidità assegnata a ciascun terreno, è stato applicato l'approccio proposto da Gingery e Elgamal (2013), che raccorda la curva di decadimento della rigidità normalizzata (Fig. 4b) alla resistenza al taglio statica; seguendo le indicazioni di Hardin e Drnevich (1972), questa è stata assunta variabile con la profondità sulla base dei parametri di Mohr-Coulomb misurati nelle prove di laboratorio (Tonni et al., 2015). Tale operazione è stata effettuata per ciascuno strato, considerandone la profondità media come riferimento.

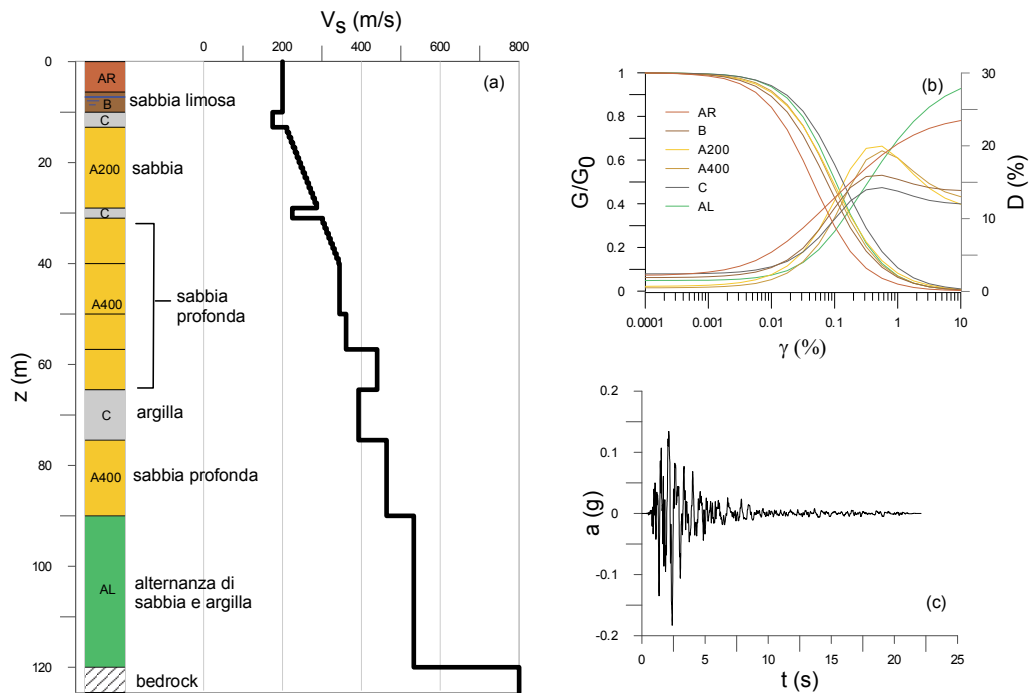


Fig 4. Modello geotecnico impiegato per l'analisi: a) colonna stratigrafica, b) profilo di velocità, c) curve di decadimento della rigidità e dello smorzamento, d) registrazione accelerometrica

L'azione sismica di riferimento è stata introdotta nelle analisi con l'obiettivo di simulare la scossa principale della sequenza sismica emiliana (20 maggio 2012, $M_L=5.9$). In mancanza di una registrazione al *bedrock* di riferimento dell'evento, si è utilizzata una *suite* di accelerogrammi registrati su affioramento rigido e con magnitudo e distanza epicentrale compatibile, estratti dall'archivio delle tracce accelerometriche italiane (Bindi et al., 2011). Seguendo il criterio di Athanasopoulos-Zekkos e Saadi (2012) per la selezione di tracce accelerometriche per analisi di liquefazione di rilevati arginali, tra gli accelerogrammi della *suite* è stata infine scelta la registrazione del terremoto Irpino-Lucano del 23.XI.1980 alla stazione di Lauria (Fig. 4c).

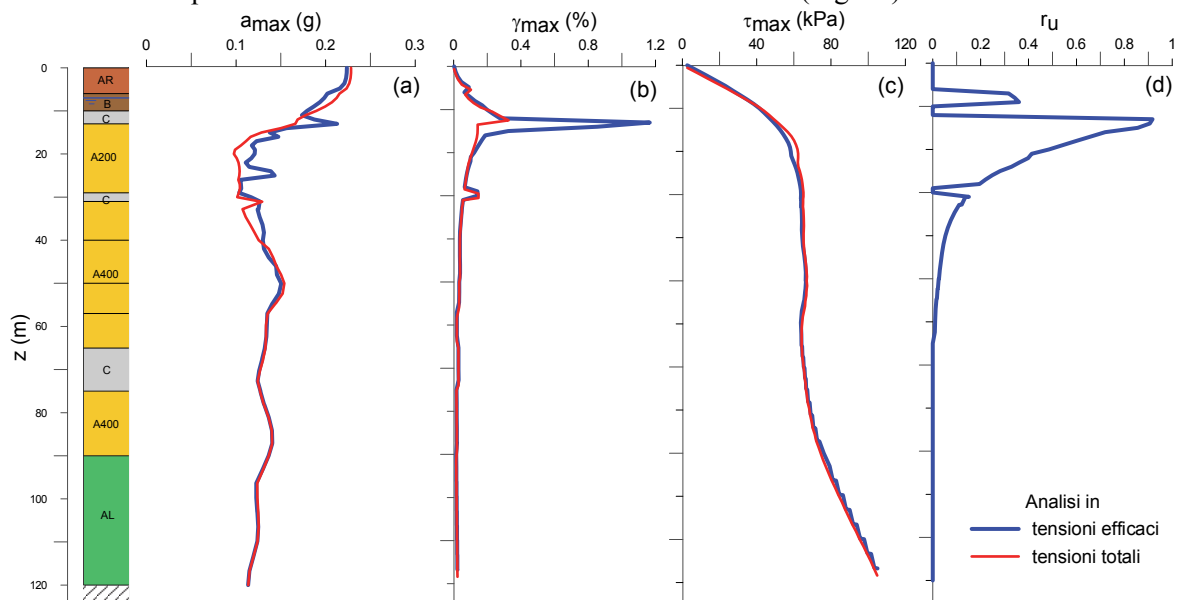


Fig 5. Risultati dell'analisi in termini di valori massimi di accelerazione (a), deformazione (b), tensione (c), e valore cumulato del rapporto di pressione interstiziale (d)

I risultati dell'analisi in tensioni efficaci mostrano, a fronte di minime differenze nel profilo delle tensioni tangenziali (Fig. 5c), un significativo accumulo di sovrappressione interstiziale nei livelli più

superficiali della formazione sabbiosa A (Fig. 5d), con conseguenti elevate deformazioni ed accelerazioni all'interfaccia tra la stessa unità A e quella argillosa C (Fig. 5 a-b). In superficie si osserva invece una lieve riduzione delle accelerazioni massime rispetto all'analisi in tensioni totali.

4. Discussione e conclusioni

Un modello semplificato per la previsione dell'incremento di sovrappressione interstiziale è stato implementato all'interno di un codice non lineare a masse concentrate. L'applicazione ad un argine danneggiato dal terremoto dell'Emilia del 2012 ha consentito di evidenziare la significativa tendenza alla liquefazione della formazione sabbiosa, a profondità confrontabili con quelle previste nello stesso sito mediante l'applicazione di alcuni tradizionali metodi empirici (Tonni et al., 2015) e nella località di Mirabello tramite analisi dinamiche in tensioni efficaci (Sinatra e Foti, 2015).

Bibliografia

- Athanasopoulos-Zekkos A., Saadi M. (2012). "Ground motion selection for liquefaction evaluation analysis of earthen levees", *Earthquake Spectra*, 28 (4): 1331-1351.
- Bindi D., Pacor F., Luzi L., Puglia R., Massa M., Ameri G., Paolucci R. (2011). "Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database", *Bull Earthquake Eng*, 9 (6): 1899–1920. ITACA 1.1, ITalian ACcelerometric Archive (1972-2011) version 1.1, <http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/>.
- Booker J.R., Rahman M.S., Seed H.B. (1976). "GADFLEA- A computer program for the analysis of pore pressure generation and dissipation during cyclic or earthquake loading", Earthquake Engineering center, University of California, Berkeley.
- Boulanger R.W., Idriss I.M., (2006). "Liquefaction susceptibility criteria for silts and clay", *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, ASCE, 132 (11): 1413-1426.
- Chiaradonna A., Tropeano G., d'Onofrio A., Silvestri F., Park D. (2015). "Application of a simplified model for the prediction of pore pressure build-up in sandy soils subjected to seismic loading" *6th Int. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering*, Christchurch, New Zealand (sottomesso).
- Fioravante V., Giretti D., Abate G., Aversa S., Boldini D., Capilleri P.P., Cavallaro A., Chamlagain D., Crespellani T., Dezi F., Facciorusso J., Ghinelli A., Grasso S., Lanzo G., Madaia C., Massimino M.R., Maugeri M., Pagliaroli A., Rainieri C., Tropeano G., Santucci De Magistris F., Sica S., Silvestri F., Vannucchi G. (2013). "Earthquake Geotechnical Engineering Aspects of the 2012 Emilia-Romagna Earthquake (Italy)". *Proc. 7th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Paper EQ-5, 34 pp.
- GEOSTUDIO International Ltd. (2007). SEEP/W User's manual. Calgary, Alberta, Canada.
- Gingery JR, Elgamal A. (2013). "Shear stress-strain curves based on the G/G_{max} logic: A procedure for strength compatibility". *Proc. 2nd International Conf. on Geotechnical and Earthquake Engineering*, Chengdu, China.
- Hardin B.O., Drnevich V.P. (1972). "Shear modulus and damping in soils: design equations and curves", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, SM7: 667-692.
- Matasovic N., Vucetic M. (1993). "Cyclic characterization of liquefiable sands", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 119 (11): 1805-1822.
- Park T., Ahn J.K. (2013). "Accumulated stress based model for prediction of residual pore pressure". *Proc. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, France, 2:1567-1570.
- Sinatra L., Foti S. (2015). "The role of aftershocks in the liquefaction phenomena caused by the Emilia 2012 seismic sequence", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 75 (2015): 234-245.
- Tonni L., Gottardi G., Amoroso S., Bardotti R., Bonzi L., Chiaradonna A., d'Onofrio A., Fioravante V., Ghinelli A., Giretti D., Lanzo G., Madaia C., Marchi M., Martelli L., Monaco P., Porcino D., Razzano R., Rosselli S., Severi P., Silvestri F., Simeoni L., Vannucchi G. (2015). "Analisi di stabilità di un argine danneggiato dalla sequenza sismica emiliana del 2012", *Rivista Italiana di Geotecnica* (in stampa).
- Tropeano G., Ausilio E., Costanzo A. (2011). "Non-linear coupled approach for the evaluation of seismic slope displacement". *Proc. 5th Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, Santiago, Chile.