

## STIMA DEL CONTENUTO DI FINE DA INDAGINI GEOTECNICHE E GEOFISICHE PER LA SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE NELLA PIANURA EMILIANO-FERRARESE

Francesco Di Buccio  
*Università degli Studi “G. d’Annunzio” Chieti-Pescara*  
*francesco.dibuccio@unich.it*

Cesare Comina  
*Università degli Studi di Torino*  
*cesare.comina@unito.it*

Daniela Fontana  
*Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia*  
*daniela.fontana@unimore.it*

Luca Minarelli  
*Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*  
*luca.minarelli@ingv.it*

Federico Vagnon  
*Politecnico di Torino*  
*federico.vagnon@polito.it*

Sara Amoroso  
*Università degli Studi “G. d’Annunzio” Chieti-Pescara*  
*Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*  
*sara.amoroso@unich.it*

### Sommario

Il contenuto di fine (FC) rappresenta un parametro fondamentale nelle analisi di liquefazione, poiché necessario nel calcolo della resistenza ciclica a liquefazione (CRR) e di conseguenza nel calcolo del fattore di sicurezza (FS). In questo studio sono stati analizzati due siti in provincia di Ferrara, Mirabello e Bondeno, per i quali sono disponibili, da studi di ricerca precedenti, indagini geotecniche in sito, misure geofisiche e prove di laboratorio eseguite in seguito al terremoto dell’Emilia-Romagna nel 2012. La presente nota riporta la calibrazione delle correlazioni proposte da Suzuki et al. (1998) e Boulanger & Idriss (2014) per il calcolo di FC da prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU) ed un nuovo approccio per il calcolo di FC da indagini geofisiche di resistività elettrica e di velocità delle onde di taglio. Per le relazioni CPT è presente un coefficiente che permette di considerare la variabilità di FC nell’ambito di un intervallo proposto dagli autori. Per le indagini geofisiche è stata sviluppata un’apposita procedura tramite l’utilizzo di “mixture theories” a partire dai dati misurati. La presenza di prove geotecniche di laboratorio ha consentito di stimare e calibrare tali correlazioni per i due siti emiliani analizzati.

### 1. Introduzione

Gli eventi sismici che nel 2012 hanno colpito fortemente il territorio dell’Emilia-Romagna (in

particolare le due scosse principali che si sono verificate il 20 e 29 maggio 2012, rispettivamente con magnitudo momento  $M_w=6.1$  e  $M_w=5.9$ ) hanno fatto registrare fenomeni di liquefazione significativi, che hanno spinto molti gruppi di ricerca ad indagare la suscettibilità alla liquefazione dell'area epicentrale emiliana al fine di quantificare e localizzare le zone a rischio (e.g. Amoroso et al., 2017, 2020; Facciorusso et al., 2016; Lai et al., 2020; Tonni et al., 2015). Nel presente studio, sono stati ripresi i risultati ottenuti dalla caratterizzazione geotecnica nei siti di Mirabello (Amoroso et al., 2017; Fontana et al., 2019) e Bondeno (Amoroso et al., 2020, 2022), entrambi in provincia di Ferrara, per i quali sono a disposizione indagini geotecniche in sito, indagini geofisiche e prove geotecniche di laboratorio. La presenza di tali prove ha permesso di utilizzare le procedure presenti in letteratura per il calcolo del contenuto di fine (FC) da prove penetrometriche statiche (CPT) (i.e. Suzuki et al., 1998; Boulanger & Idriss, 2014) ed un nuovo approccio per il calcolo di FC da indagini geofisiche di resistività elettrica e di velocità delle onde di taglio, con lo scopo di fornire indicazioni relative al loro utilizzo nello studio dei siti emiliani. Come noto il contenuto di fine risulta essere un parametro fondamentale nelle analisi di liquefazione, essendo necessario per correggere il valore della resistenza penetrometrica normalizzata ( $q_{eIN}$ ) nel calcolo della resistenza ciclica a liquefazione (CRR) (e.g. Boulanger & Idriss, 2014). Pertanto, queste procedure possono rappresentare un buon compromesso per stimare, utilizzando prove in sito e misure geofisiche, un profilo del contenuto di fine continuo con la profondità.

## 2. Siti analizzati

I casi studio presi in esame fanno riferimento a due siti in provincia di Ferrara, entrambi localizzati nelle periferie rispettivamente del comune di Mirabello, frazione del comune di Terre del Reno, e di Burana, frazione del comune di Bondeno (Figura 1a). In entrambi i siti, a seguito degli eventi sismici del 2012, si sono verificati fenomeni di liquefazione, e per tale motivo queste aree sono state oggetto di studio per numerose ricerche, tra le quali quelle a cui fanno riferimento i dati utilizzati in questo lavoro (Amoroso et al., 2017, 2020, 2022; Fontana et al., 2019). La scelta è ricaduta su questi siti poiché, oltre ad essere state eseguite le prove geotecniche in sito con piezocono (CPTU) e con dilatometro sismico (SDMT) ed indagini geofisiche (tomografie elettriche, ERT e prove down hole, DH), sono state effettuate anche analisi granulometriche, che hanno quindi permesso di testare le procedure presenti in letteratura per il calcolo del contenuto di fine da prove in sito. In particolare, per il sito di Mirabello sono state eseguite cinque prove CPTU, cinque prove SDMT, una ERT ed una prova DH ed un foro di sondaggio (Figura 1b). Nel sito di Bondeno sono state eseguite quattro CPTU, due prove SDMT, una ERT e due fori di sondaggio (Figura 1c).

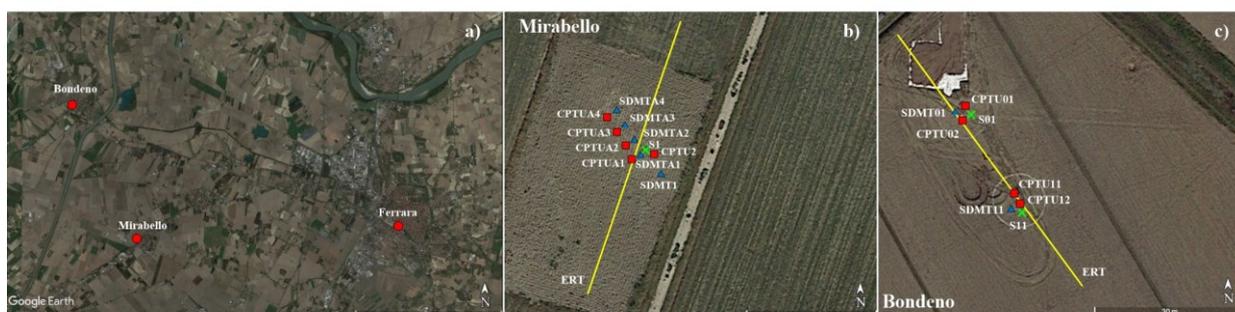


Fig. 1. a) Ubicazione dei siti analizzati; b) ubicazione delle prove nel sito di Mirabello; c) ubicazione delle prove nel sito di Bondeno.

In Figura 2a sono riportati i modelli geotecnici ricavati dall'interpretazione delle prove a disposizione. In entrambi i siti si può osservare una crosta non liquefacibile, caratterizzata da un contenuto di fine

(FC) maggiore del 70% nei primi 6 m del sito di Mirabello e superiore al 65% nei primi 3.5-4 m del sito di Bondeno. Negli strati sottostanti sono presenti principalmente limi sabbiosi e sabbie limose con valori di FC anche relativamente elevati (da 20% a 75% per il sito di Mirabello, da 10% a 45% per il sito di Bondeno).

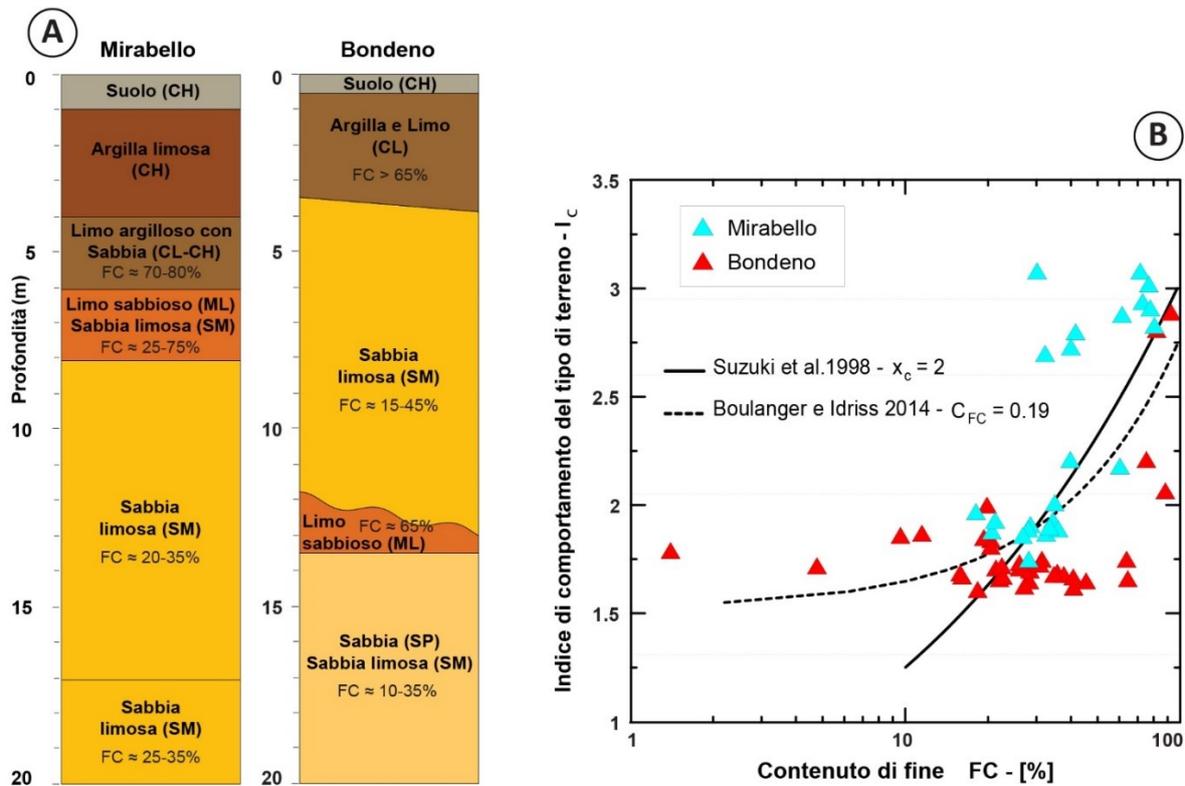


Fig. 2. a) Schema dei profili stratigrafici dei siti di Mirabello e Bondeno; b) correlazioni di Suzuki et al. (1998) e Boulanger & Idriss (2014) con utilizzo dei coefficienti proposti in questo studio.

### 3. Stima del contenuto di fine

#### 3.1 Prove geotecniche in sito

Per il calcolo di FC mediante l'utilizzo di prove geotecniche in sito sono presenti in letteratura alcune correlazioni empiriche che legano questo parametro con l'indice di comportamento del tipo di terreno ( $I_c$ ) ottenuto dalla prova penetrometrica statica (CPT). In questo lavoro è stato fatto riferimento alle equazioni proposte da Suzuki et al. (1998) e Boulanger & Idriss (2014) riportate di seguito:

$$FC = x_c \cdot (2.8 \cdot I_c^{2.6}) \quad (\text{Suzuki et. al, 1998}) \quad (1)$$

$$FC = 80 \cdot (I_c + C_{FC}) - 137 \quad (\text{Boulanger \& Idriss, 2014}) \quad (2)$$

Entrambe le soluzioni prevedono l'uso di coefficienti ( $x_c$  per Suzuki et al., 1998;  $C_{FC}$  per Boulanger & Idriss, 2014) che permettono di considerare la variabilità dei dataset utilizzati dagli autori. Per la relazione di Boulanger & Idriss (2014) il coefficiente  $C_{FC}$  varia da un valore minimo di -0.29 ad un massimo di 0.29 mentre nella relazione di Suzuki et al. (1998) il coefficiente  $x_c$  varia da 0.5 a 2. Nel presente studio sono state analizzate queste relazioni in funzione dei dati CPT e di laboratorio disponibili per i siti di Mirabello e Bondeno per stabilire quale coefficiente permetta di ottenere un miglior accordo per queste aree emiliane. In Figura 2b sono riportate le curve ottenute per i due siti in relazione alle coppie di  $I_c$  ed FC. In questo caso per avere un valore unico dell'indice di comportamento del tipo di terreno da relazionare al contenuto di fine è stata fatta una media in prossimità della profondità nella quale è stato prelevato il campione. Per quanto riguarda la relazione

di Boulanger & Idriss (2014) si è osservato che i valori di  $C_{FC}$  che garantiscono un discreto fitting variano da 0.15 a 0.25. In Figura 2b è riportata la curva con  $C_{FC}$  pari a 0.19 poiché è il valore che permette di avere un ragionevole accordo per tutto il range di FC considerato. Per la relazione di Suzuki et al. (1998) i valori che ricadono in prossimità del limite superiore del range proposto dall'autore ( $x_c = 2$ ) garantiscono un buon fitting. Individuati i coefficienti per queste relazioni nei siti in esame, sono stati eseguiti dei confronti tra il contenuto di fine ottenuto da analisi granulometriche e quello calcolato da prove CPTU. In Figura 3 è riportato un esempio dell'applicazione di queste correlazioni nelle verticali relative al sondaggio S1 e prova CPTU A1 e al sondaggio S11 e prova CPTU12 rispettivamente per i siti di Mirabello e Bondeno. Dal confronto si può osservare che entrambe le relazioni permettono di ottenere un discreto accordo con quanto misurato in laboratorio.

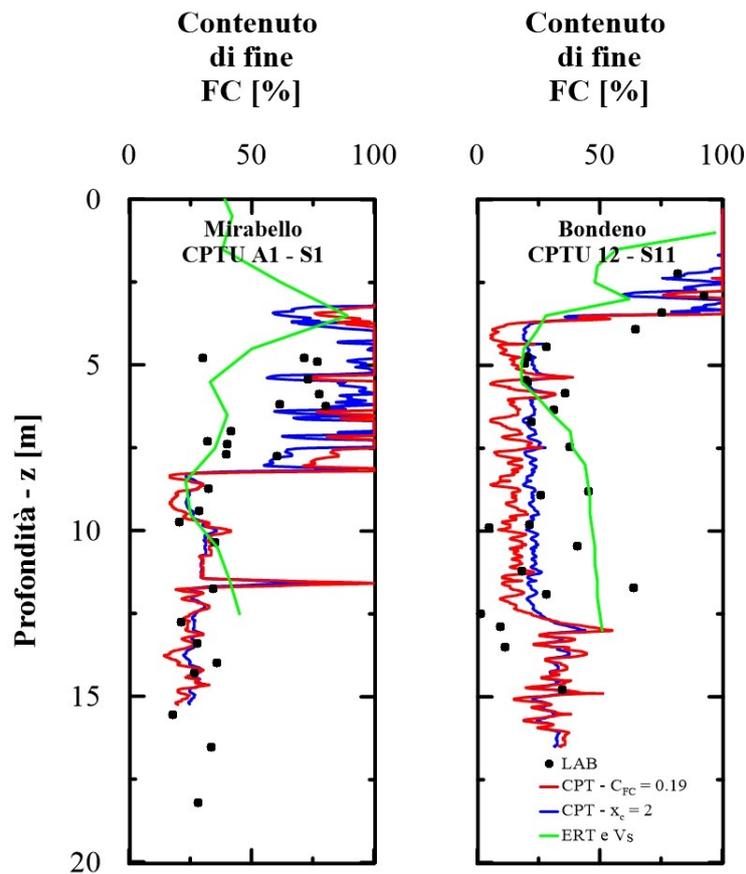


Fig. 3. Confronto tra contenuto di fine calcolato mediante i coefficienti proposti in questo studio ed il contenuto di fine ottenuto dalle analisi granulometriche.

### 3.2 Indagini geofisiche

Per il calcolo di FC mediante l'utilizzo di prove geofisiche in sito sono state proposte diverse metodologie. In particolare, recenti lavori di letteratura hanno suggerito l'uso di misure geofisiche combinate di resistività elettrica,  $R$ , e velocità delle onde di taglio,  $V_s$  per la determinazione di FC attraverso appropriate "mixture theories". Ad esempio, Goff et al. (2005) hanno proposto una nuova relazione tra tipo di suolo,  $R$  e  $V_s$ ; Hayashi et al. (2013) hanno sviluppato un'equazione polinomiale multivariabile del secondo ordine a partire dalla regressione ai minimi quadrati di dati di  $R$  e  $V_s$  per distinguere argille, sabbie e ghiaie; recentemente, Takahashi et al. (2014) hanno proposto un metodo per la valutazione del contenuto di argilla a partire da dati di  $R$  e  $V_s$  implementando il modello di Glover (Glover et al., 2000); un approccio simile è stato adottato da Vagnon et al. (2022a, 2022b) per ottenere sezioni 2D di FC da misure combinate di  $R$  e  $V_s$  lungo gli argini fluviali. Quest'ultimo approccio è stato quello utilizzato anche nel presente lavoro. Assumendo dei valori di riferimento per alcuni parametri costitutivi del terreno (porosità critica, grado di saturazione densità media e resistività e velocità delle onde di taglio della sabbia e dell'argilla), è possibile ottenere il valore di FC per una

data profondità a partire dai profili di R e Vs misurati in sito. In particolare, utilizzando il modello di Hashin-Shtrikman (Hashin and Shtrikman, 1963) è possibile associare i valori di R e Vs a delle curve teoriche di FC e dedurre a posteriori il valore in sito. In Figura 3 è riportato un esempio dell'applicazione di questa metodologia nelle verticali indagate rispettivamente per i siti di Mirabello e Bondeno. Dal confronto si può osservare che la metodologia proposta permette di ottenere un ragionevole accordo con quanto misurato in laboratorio.

#### **4. Conclusioni**

In questo lavoro, sono state analizzate le correlazioni proposte da Suzuki et al. (1998) e Boulanger & Idriss (2014) per il calcolo del contenuto di fine mediante l'interpretazione delle prove CPTU ed un nuovo approccio per il calcolo dello stesso contenuto di fine da indagini geofisiche. La disponibilità di prove geotecniche in sito, misure geofisiche e prove di laboratorio nei siti di Mirabello e Bondeno ha permesso di calibrare le correlazioni CPT esistenti e di proporre nuove formulazioni da indagini geofisiche, fornendo indicazioni utili per l'esecuzione di analisi di liquefazione nei siti emiliani.

Dall'analisi dell'indice di comportamento del tipo di terreno da CPT e del contenuto di fine da analisi granulometriche sono stati ricavati i coefficienti ( $C_{FC} = 0.19$  e  $x_c = 2$ ) che meglio rappresentano i siti in esame. Per le indagini geofisiche è stata testata e calibrata un'apposita procedura già sviluppata per l'analisi delle strutture arginiali.

Infine è stata eseguita un'applicazione di queste correlazioni su una verticale per ogni sito, confrontando il contenuto di fine ottenuto dai metodi proposti con quelli disponibili dalle analisi granulometriche. I confronti eseguiti mostrano un ragionevole accordo con quanto misurato in laboratorio.

Le correlazioni proposte, come già evidenziato da altri autori per le prove CPT (e.g. Boulanger & Idriss, 2014), risultano sito-specifiche, considerata la variabilità geologica presente nello spazio, la limitazione di  $I_c$  nell'attribuzione delle categorie di terreno e l'incertezza associata all'influenza della plasticità del terreno ( $I_c$  è un indice di comportamento del terreno e non un indicatore della sua granulometria). Pertanto, in mancanza di dati di laboratorio per costruire correlazioni sito-specifiche, si suggerisce un uso di tali formulazioni limitato a contesti deposizionali simili presenti in Emilia-Romagna.

I risultati ricavati tramite le informazioni derivanti da prove geofisiche hanno mostrato anch'essi un discreto accordo con i dati di laboratorio. La possibilità di estrarre dati di FC dai risultati di prove geofisiche apre interessanti prospettive anche rispetto ad una potenziale visualizzazione del parametro di interesse lungo sezioni bidimensionali e non soltanto su profili verticali come proposto in questa nota. La visualizzazione 2D della distribuzione di FC può infatti permettere una più accurata analisi della variabilità laterale delle formazioni indagate ed offrire uno strumento più efficace rispetto alla valutazione della suscettibilità alla liquefazione. La procedura proposta ha già dimostrato la sua efficacia in tal senso.

I dati elaborati nel presente studio fanno riferimento principalmente ad analisi granulometriche eseguite all'interno di strati liquefacibili sabbioso-limosi. Sono in corso studi di approfondimento (1) per poter testare queste correlazioni anche ad un dataset di terreni a grana fine con lo scopo di ampliare l'applicabilità del metodo anche a terreni limoso-argillosi; (2) per proporre correlazioni sito-specifiche da prove con dilatometro piatto (DMT) mediante l'indice del materiale  $I_D$ .

#### **Ringraziamenti**

Questo lavoro è parte del progetto di ricerca "Search of Excellence - UdA 2019" finanziato dall'Università degli Studi "G. d'Annunzio" Chieti-Pescara, dal titolo "Evaluation and Improvement of Methods to Consider Influence of Surface Clay Layers on Liquefaction-Induced Settlement (CLIQUEST)".

#### **Bibliografia**

Amoroso S., Milana G., Rollins K.M., Comina C., Minarelli L., Manuel M.R., Monaco P., Franceschini M., Anzidei M., Lusvardi C., Cantore L., Carpena A., Casadei S., Cinti F. R., Civico R., Cox B.R., De Martini P.M.,

- Di Giulio G., Di Naccio D., Di Stefano G., Facciorusso J., Famiani D., Fiorelli F., Fontana D., Foti S., Madiati C., Marangoni V., Marchetti D., Marchetti S. L., Martelli L., Mariotti M., Muscolino E., Pancaldi D., Pantosti D., Passeri F., Pesci A., Romeo G., Sapia V., Smedile A., Stefani M., Tarabusi G., Teza G., Vassallo M., Villani F. (2017). “The first Italian blast-induced liquefaction test 1 (Mirabello, Emilia-Romagna, Italy): Description of the experiment and preliminary results”, *Annals of Geophysics*, 60(5): S0556. doi: 10.4401/ag-7415.
- Amoroso S., Rollins K.M., Andersen P., Gottardi G., Tonni L., García Martínez M.F., Wissmann K., Minarelli L., Comina C., Fontana D., De Martini P.M., Monaco P., Pesci A., Sapia V., Vassallo M., Anzidei M., Carpena A., Cinti F., Civico R., Coco I., Conforti D., Doumaz F., Giannattasio F., Di Giulio G., Foti S., Loddo F., Lugli S., Manuel M.R., Marchetti D., Mariotti M., Materni V., Metcalfe B., Milana G., Pantosti D., Pesce A., Salocchi A.C., Smedile A., Stefani M., Tarabusi G., Teza G. (2020). “Blast-induced liquefaction in silty sands for full-scale testing of ground improvement methods: insights from a multidisciplinary study”, *Engineering Geology*, 265: 105437, 17, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105437.
- Amoroso S., García Martínez, M.F., Monaco P., Tonni L., Gottardi G., Rollins K.M., Marchetti D., Wissmann, K.J. (2022). “Comparative study of CPTU and SDMT in liquefaction-prone silty sands with ground improvement”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(6), 04022038. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002801
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Report No. UCD/CGM.-14, 1.
- Facciorusso J., Madiati C., Vannucchi G. (2016). “The 2012 Emilia earthquake (Italy): geotechnical characterization and ground response analyses of the paleo-Reno river levees”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 86:71–88, doi: 10.1016/j.soildyn.2016.04.017.
- Fontana D., Amoroso S., Minarelli L., Stefani M. (2019). “Sand liquefaction phenomena induced by a blast test: new insights from composition and texture of sands (late Quaternary, Emilia, Italy)”, *Journal of Sedimentary Research*, 89(1):13-27, doi: 10.2110/jsr.2019.1.
- Glover P. W. J., Hole M. J., Pous J. (2000). “A modified Archie’s law for two conducting phases”, *Earth and Planet. Sci. Let.*, 180(3–4): 369–383.
- Goff D. S., Lorenzo J. M., Hayashi K. (2015). “Resistivity and shear wave velocity as a predictive tool of sediment type in coastal levee foundation soils”, Proc. 28<sup>th</sup> Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2015, SAGEEP 2015, 145–154.
- Hashin Z., Shtrikman S. (1963). “A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 11(2): 127–140.
- Hayashi K., Inazaki T., Kitao K., Kita T. (2013). “Statistical estimation of geotechnical soil parameters in terms of cross-plots of S-wave velocity and resistivity in Japanese levees”, Proc. Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 83<sup>rd</sup> Annual Meeting, SEG 2013: Expanding Geophysical Frontiers, 1259–1263.
- Lai C.G., Bozzoni F., Conca D., Famà A., Özcebe A. G., Zuccolo E., Meisina C., Boni R., Bordoni M., Cosentini R. M., Martelli L., Poggi V., Viana da Fonseca A., Ferreira C., Rios S., Cordeiro D., Ramos C., Molina-Gómez F., Coelho C., Logar J., Maček M., Oblak A., Ozcep F., Bozbey I., Oztoprak S., Sargin S., Aysal N., Oser C., Kelesoglu M. K. (2020). “Technical guidelines for the assessment of earthquake induced liquefaction hazard at urban scale.”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1–45.
- Suzuki, Y. Sanematsu, T., Tokimatsu, K. (1998). “Correlation between SPT and seismic CPT”. Proc. 1<sup>st</sup> International Conference on Site Characterization, 2: 1375-1380.
- Takahashi T., Aizawa T., Murata K., Nishio H., Consultants S., Matsuoka T. (2014). “Soil permeability profiling on a river embankment using integrated geophysical data”, Proc. Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 84<sup>th</sup> Annual Meeting SEG 2014: 4534–4538.
- Tonni L., Gottardi G., Amoroso S., Bardotti R., Bonzi L., Chiaradonna A., d’Onofrio A., Fioravante V., Ghinelli A., Giretti D., Lanzo G., Madiati C., Marchi M., Martelli L., Monaco P., Porcino D., Razzano R., Rosselli S., Severi P., Silvestri F., Simeoni L., Vannucchi G., Aversa S. (2015). “Interpreting the deformation phenomena triggered by the 2012 Emilia seismic sequence on the Canale Diversivo di Burana banks”, *Rivista Italiana di Geotecnica*, Anno XLIX, 2: 28-38.
- Vagnon F., Comina C., Arato A. (2022a). “Evaluation of different methods for deriving geotechnical parameters from electric and seismic streamer data”, *Engineering Geology*, 2022, 303, 106670
- Vagnon F., Comina C., Arato A., Chiappone A., Cosentini R.M., Foti S. (2022b). Geotechnical screening of linear earth structures: electric and seismic streamers data for hydraulic conductivity assessment of the Arignano earth dam. *J. of Geotech. and Geoenv. Eng.*