

## **INTERPRETAZIONE DI PROVE DI LIQUEFAZIONE IN CENTRIFUGA CON E SENZA INTERVENTI DI MITIGAZIONE**

Gianluca Fasano

*Università degli Studi di Napoli Federico II*

[gianluca.fasano@unina.it](mailto:gianluca.fasano@unina.it)

Valeria Nappa

*Università degli Studi di Napoli Federico II*

[valeria.nappa@unina.it](mailto:valeria.nappa@unina.it)

Alessandro Flora

*Università degli Studi di Napoli Federico II*

[flora@unina.it](mailto:flora@unina.it)

Emilio Bilotta

*Università degli Studi di Napoli Federico II*

[bilotta@unina.it](mailto:bilotta@unina.it)

Vincenzo Fioravante

*Università degli Studi di Ferrara*

[vincenzo.fioravante@unife.it](mailto:vincenzo.fioravante@unife.it)

### **Sommario**

Nella presente nota si mostrano alcuni risultati di sperimentazione in centrifuga geotecnica effettuata presso l'ISMGEO (Seriato), nell'ambito del progetto europeo LIQUEFACT (H2020). L'obiettivo di tali prove è quello di studiare i fenomeni che regolano la suscettibilità a liquefazione di un terreno. Il programma di prove ha previsto la realizzazione sia di modelli per lo studio dell'innescò del fenomeno della liquefazione, in condizioni di campo libero e in presenza di un modello di edificio, sia di modelli in cui sono state implementate alcune possibili tecniche di mitigazione (drenaggio e desaturazione). Nella nota si riportano considerazioni sull'efficacia di questi interventi e si presentano i primi risultati delle simulazioni numeriche effettuate per interpretare gli esperimenti effettuati.

### **1. Il fenomeno della liquefazione**

La liquefazione dei terreni è un fenomeno che viene innescato dal progressivo accumulo di sovrappressioni del fluido interstiziale dovuto ad azioni dinamiche. Tale accumulo riduce progressivamente le tensioni efficaci fino ad annullarle e l'attingimento di quest'ultimo stadio comporta la totale perdita di resistenza a taglio del terreno che assume il comportamento di un fluido viscoso. Eventi recenti hanno dimostrato che i fenomeni di liquefazione sono responsabili in alcuni casi anche della metà delle perdite economiche causate dai terremoti. Pertanto, risulta fondamentale comprendere e studiare i fattori che contribuiscono all'innescò del fenomeno, per poter scegliere la strategia di mitigazione più adeguata, considerando la suscettibilità del sito alla liquefazione, il tipo e la dimensione della struttura da proteggere. Prove sperimentali su modello, come quelle in centrifuga, costituiscono dunque una solida base per l'interpretazione del fenomeno e per la valutazione dell'efficacia delle tecniche di mitigazione.

## 2. Programma delle prove in centrifuga

Le prove in centrifuga condotte nell'ambito del progetto LIQUEFACT, sono state eseguite presso il laboratorio ISMGEO (Istituto Sperimentale Modelli Geotecnici) di Seriate (BG). Obiettivo della sperimentazione è quello di valutare l'efficacia di possibili tecniche di mitigazione del fenomeno della liquefazione. A tale scopo sono state eseguite prove in condizioni di campo libero e con un modello di edificio, e in presenza di tre tecniche di mitigazione. Le 37 prove realizzate sono state suddivise in 3 serie: la prima volta a indagare le condizioni di innesco del fenomeno di liquefazione, la seconda e la terza dedicate all'analisi dell'efficacia delle tre tecniche di mitigazione. Più in dettaglio, durante la prima serie di prove, sono state analizzate due possibili configurazioni stratigrafiche: nella prima è stato considerato un sottosuolo omogeneo sabbioso, nella seconda è stata considerata la presenza di uno strato di materiale a grana fine, a copertura dello strato di sabbia. I modelli sono stati realizzati con tre tipologie di sabbia: sabbia di Ticino, e sabbia di Pieve di Cento naturale (con circa il 12% di contenuto di fine), sabbia di Pieve di Cento privata della frazione fine. La sabbia è stata depositata per pluviatura con una densità relativa di circa 45% per tutti i modelli.

Nella seconda serie di prove sono stati installati dreni orizzontali e verticali variandone l'interasse, per verificarne la capacità di dissipazione delle sovrappressioni neutre.

Infine, nella terza serie di prove si è valutata l'efficacia della tecnica di parziale desaturazione indotta. I modelli sono stati parzialmente desaturati mediante iniezione d'aria, variando il numero e la posizione degli iniettori. Per ognuna di queste configurazioni, le prove sono state condotte in condizioni di campo libero e considerando la presenza di una semplice struttura su fondazioni superficiali, al fine di valutare gli effetti dell'interazione. La struttura riprodotta in centrifuga è caratterizzata da periodo proprio pari a 0.3s, definito sulla base di una prova di vibrazione libera. Tutte le prove sono state svolte considerando un fattore di scala N pari a 50g.

Le storie temporali di accelerazione applicate alla base del modello sono state ottenute attraverso una procedura volta a riprodurre il moto sismico previsto a una profondità di 15 m alla scala del prototipo (Ozcebe et al., non pubblicato).

In figura 1 si riporta, in scala prototipo, uno dei segnali applicati nelle prove e il rispettivo spettro di Fourier. I risultati mostrati nella sezione seguente sono da riferirsi al medesimo segnale.

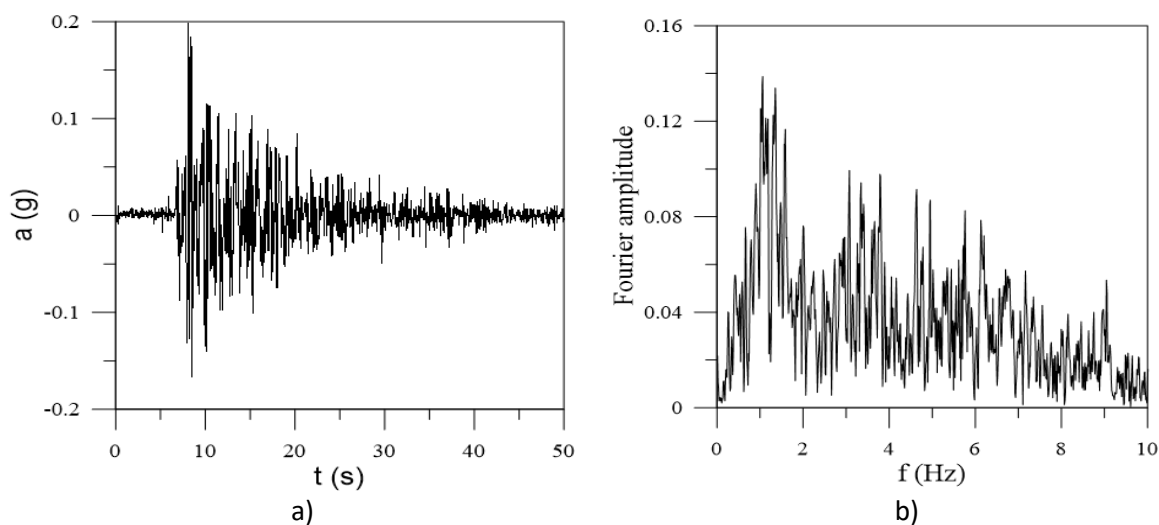


Fig 1. Segnale di ingresso utilizzato nelle prove in centrifuga a) e rispettivo spettro di Fourier b)

### 3. Evidenze sperimentali

#### 3.1 Prove senza interventi di mitigazione

Lo scopo principale di questa serie di prove è di riprodurre la risposta sismica del sottosuolo modello (omogeneo o stratificato) in condizioni di campo libero e con una semplice struttura. I modelli sono stati sottoposti a diversi segnali di energia crescente, fino all'innescio della liquefazione.

In figura 2 si riportano gli schemi geometrici riferiti al modello omogeneo con sabbia del Ticino, (a) con e (b) senza struttura, e la strumentazione utilizzata.

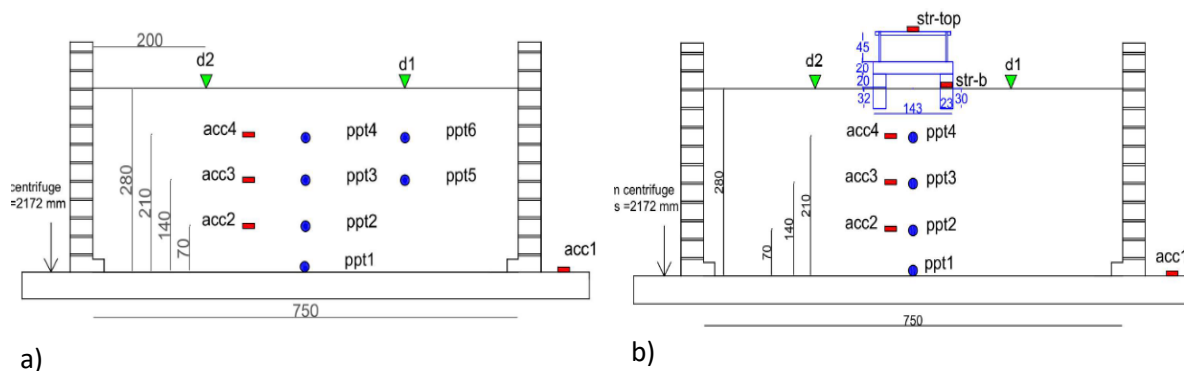


Fig. 2. Schemi adottati per le prove in centrifuga; a) omogeneo; b) omogeneo con struttura

Dal confronto tra i risultati ottenuti nei due modelli di sottosuolo omogeneo (Figura 2), in termini di accumulo di sovrappressioni neutre registrate durante il sisma si evince che, a parità di input sismico, nel caso di campo libero si innesca il fenomeno della liquefazione, mentre ciò non accade in presenza della struttura. In questo caso, l'incremento di tensioni verticali dovuto al peso proprio della struttura stessa fa sì che al di sotto di essa non raggiungano condizioni di liquefazione. Al fine del raggiungimento di tale condizione è stato necessario amplificare la storia temporale di accelerazione applicata al modello.

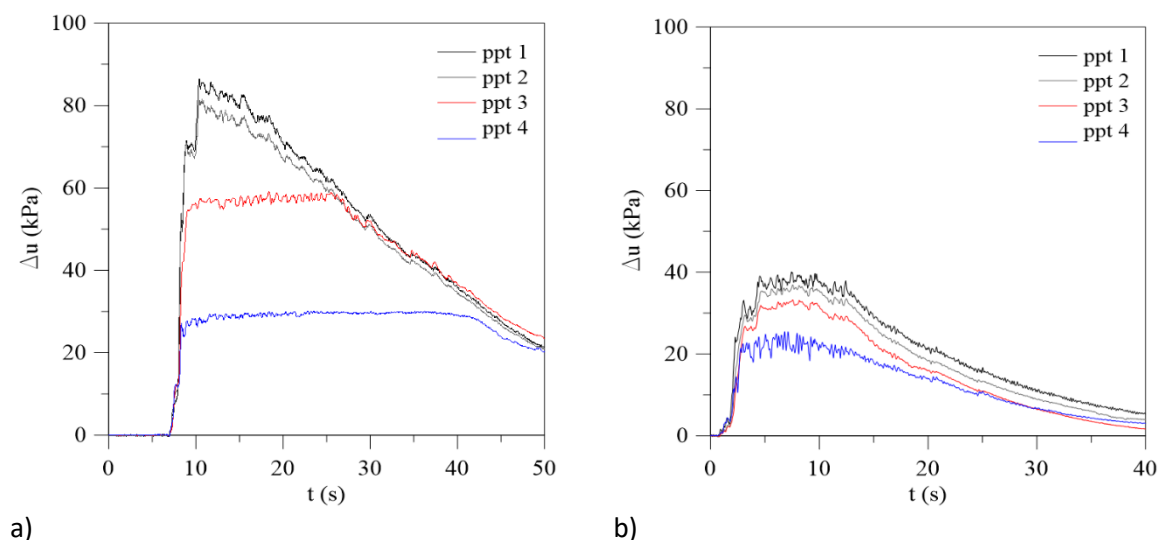


Fig. 3. Accumulo di sovrappressioni neutre durante l'input sismico ottenute nel modello con stratigrafia omogenea: a) condizioni di campo libero; b) in presenza della struttura

Tali modelli costituiscono il riferimento per tutte le successive prove per la valutazione dell'efficacia delle tecniche di mitigazione.

### 3.2 Prove con intervento di mitigazione

In questa sezione vengono presentati e discussi alcuni risultati delle prove effettuate su modelli in cui sono state implementate tecniche di mitigazione in condizioni di campo libero. La prima tecnica di mitigazione esplorata prevede l'utilizzo di dreni verticali (Fig. 4a), la seconda di dreni orizzontali (Fig. 4b). I dreni verticali sono stati disposti a maglia quadrata, quelli orizzontali a quinconce. In entrambi i casi è stato adottato un interasse di 5 e 10 volte il diametro. Infine è stato modellato l'effetto di una parziale saturazione indotta (Fig. 4c) iniettando aria nello strato di terreno liquefacibile per ridurre il grado di saturazione, aumentando la compressibilità del fluido di porosità e riducendo così l'accumulo di pressioni neutre durante lo scuotimento.

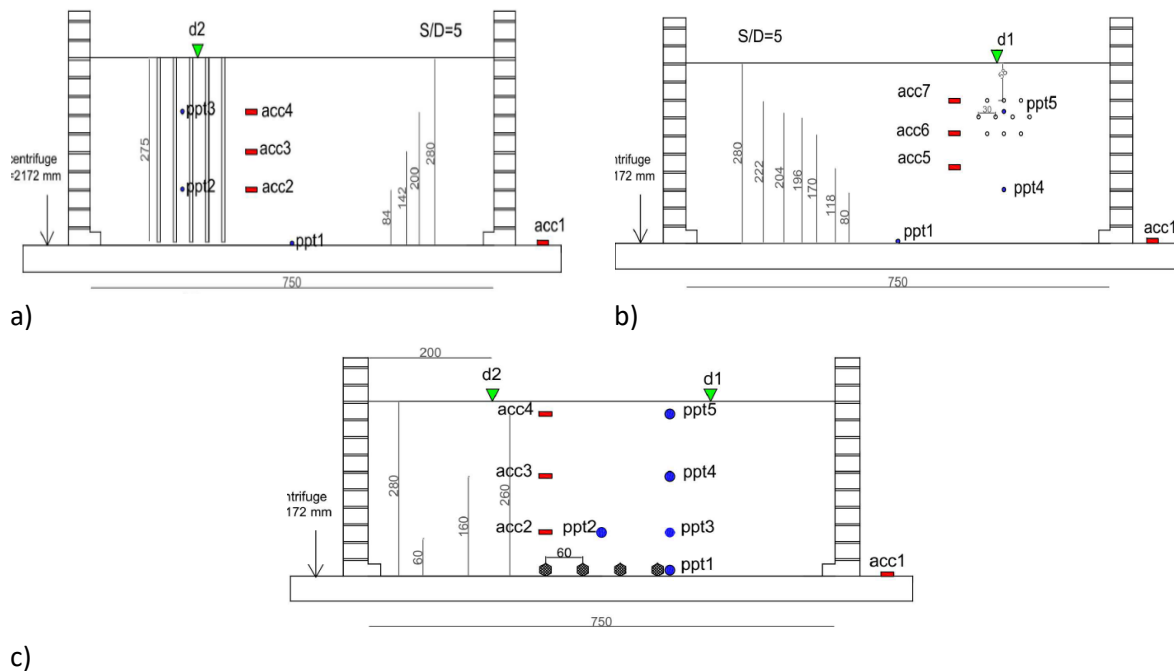
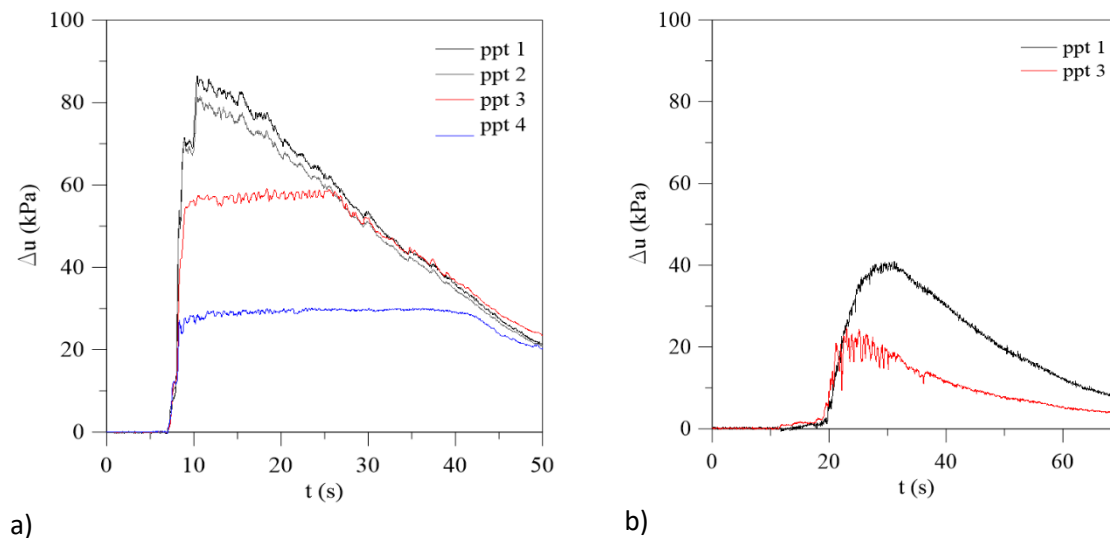


Fig. 4. Schemi adottati per le prove in centrifuga con tecniche di mitigazione; a) dreni verticali; b) dreni orizzontali; c) parziale desaturazione indotta

I risultati ottenuti in termini di accumulo di sovrappressioni neutre  $\Delta u$ , sono confrontati in figura 5 con quelli ottenuti nel modello di riferimento (Figura 5a) in assenza di tecniche di mitigazione. Sia i dreni orizzontali che quelli verticali producono una evidente riduzione dell'accumulo di sovrappressioni neutre rispetto al caso di riferimento.



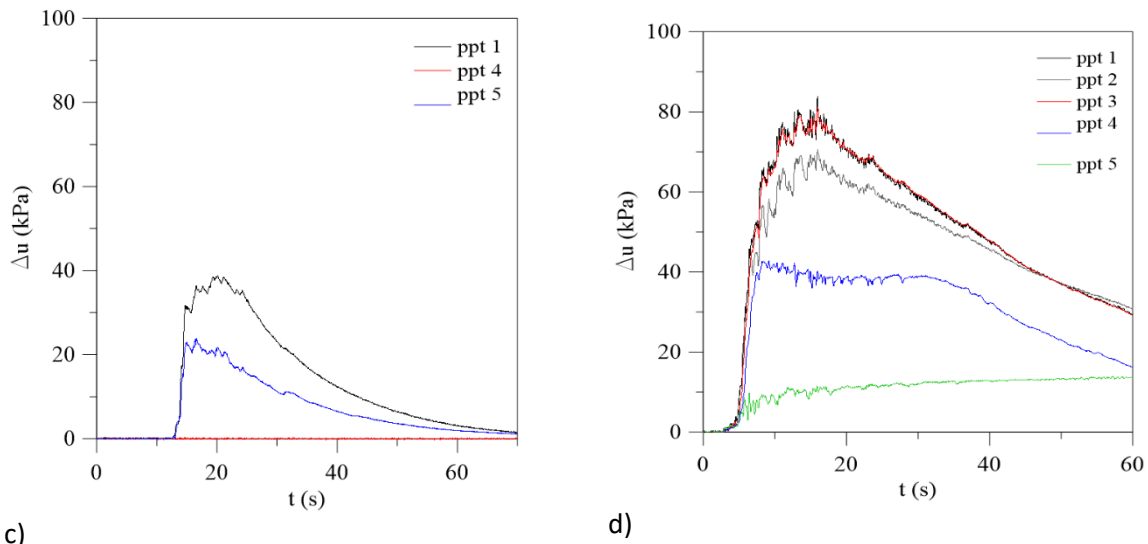


Fig. 5. Accumulo di sovrappressioni neutre condizioni di campo libero: a) in assenza di tecniche di mitigazione; in presenza di: b) dreni verticali; c) dreni orizzontali; d) parziale desaturazione indotta

La tecnica di parziale desaturazione indotta, in questo caso è risultata poco efficace, come mostrano i valori di sovrappressione misurata che sono paragonabili a quelli registrati nel modello di riferimento.

#### 4. Primi risultati delle simulazioni numeriche

##### 4.1 Prova senza interventi di mitigazione

Le prove in centrifuga costituiscono un modello di riferimento per effettuare delle analisi numeriche più estese. A tale scopo è stato necessario in primo luogo calibrare i modelli sulla base dei risultati sperimentali in centrifuga ottenuti. Le simulazioni numeriche sono state eseguite con il software Plaxis2D (Brinkgreve et al., 2018), utilizzando due modelli costitutivi per verificarne l'affidabilità nella riproduzione dei dati sperimentali. I modelli costitutivi usati sono UBCSAND (Puebla et al., 1997) e PM4SAND (Boulanger, & Ziotopoulou, 2015). Si riportano in tabella 1 le proprietà della sabbia di Ticino, in tabella 2 e 3 i parametri adottati nelle simulazioni per i due modelli costitutivi. I contorni laterali sono stati modellati con gli elementi *tied degree of freedom* che consentono spostamenti uguali a nodi posti alla stessa quota, in modo da riprodurre le condizioni al contorno imposte dalla scatola nelle prove in centrifuga.

Tab. 1. Proprietà meccaniche della sabbia di Ticino

$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_0$ (-)	$G_s$ (-)	$D_r$ (-)
14	19	0.76	2.65	0.47

Tab. 2. Parametri adottati per le analisi numeriche con PM4sand

$G_0$	$hp_0$	$p_A$ (kN/m <sup>2</sup> )	$e_{max}$	$e_{min}$	$n_b$	$n_d$	$\phi_{cv}$	$\nu$	$Q$	$R$
374	0.15	101.3	0.923	0.574	0.3	0.1	33	0.3	10	1.5

Tab. 3. Parametri adottati per le analisi numeriche con UBCSAND

$k^*_B$ <sup>e</sup>	$k^*_G$ <sup>e</sup>	$k^*_G$ <sup>p</sup>	$m_e$	$n_e$	$n_p$	$\phi_{cv}$ (°)	$\phi_p$ (°)	$(N_1)_{60}$	$f_{dens}$	$f_{Epost}$
1067	800	308	0.5	0.5	0.4	33	35	9.3	0.3	1

Si evince che entrambi i modelli riescono a cogliere piuttosto bene il comportamento osservato in termini di accumulo di sovrappressioni neutre (Figura 6) e accelerazioni, ma nessuno dei due riesce a calcolare correttamente i cedimenti misurati al piano di campagna.

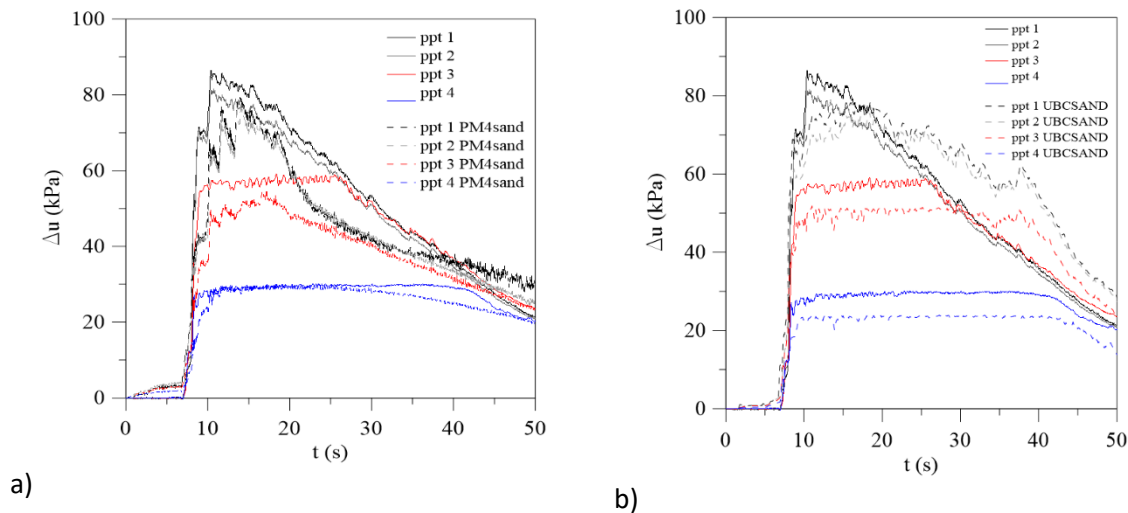


Fig. 6 Risultati della calibrazione del modello in PLAXIS2D in termini di accumulo di sovrappressioni neutre: a) PM4sand; b) UBCSAND

## 5. Conclusioni

L'analisi dei risultati delle prove condotte non è ancora conclusa, pertanto sembra prematuro trarre considerazioni di carattere molto generale. Entrambe le tecniche (drenaggio e parziale saturazione) conseguono, seppure con diversa efficacia, l'obiettivo di mitigare l'insorgere della liquefazione. La calibrazione del modello numerico sui risultati delle prove consentirà di estendere lo studio al fine di conseguire indicazioni adeguate per la progettazione della tecnica di mitigazione più efficace.

## Bibliografia

- Boulanger, R.W., Ziotopoulou, K. (2015): PM4Sand (Version 3): a sand plasticity model for earthquake engineering applications, 112 pp. Report No. UCD/CGM-15/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA
- Brinkgreve, R.B.J., Kumarwamy, S., Swolfs, W.M., Foria F. (2018). Plaxis, Reference Manual, The Netherlands.
- Ozcebe A.G., Lai C.G., E. Zuccolo, Bozzoni F., Famà A. (non pubblicato.). Definition of shake table motions. WP4 Internal Report. LIQUEFACT project.
- Puebla H., Byrne M., and Phillips P. (1997). Analysis of canlex liquefaction embankments prototype and centrifuge models. Canadian Geotechnical Journal, 34:641657.