

MITIGAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE DI SABBIE SCIOLTE CON INIEZIONI DI MISCELE PLASTICHE: PRIMI RISULTATI SPERIMENTALI

Mele L. *, Astuto G. *, Flora A. *, Lirer S. **, Bilotta E. *, d'Onofrio A. *, Verdolotti L. ***

* Università degli Studi di Napoli Federico II

** Università degli Studi Guglielmo Marconi

*** CNR- IPCB Istituto per i Polimeri, Compositi e Biomateriali

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

SOMMARIO

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

Parole chiave: rischio liquefazione, consolidamento, prove cicliche, curva di resistenza ciclica.

1 INTRODUZIONE

Tra i numerosi eventi sismici che hanno colpito l'Italia negli anni, il sisma dell'Emilia del 2012 (Lombardi D. e Bhattacharya S., 2014) ha suscitato particolare interesse negli studiosi di tutto il mondo a causa della comparsa, per la prima volta testimoniati chiaramente in Italia, di localizzati fenomeni di liquefazione. L'Italia, benché fosse considerata da sempre un Paese ad alto rischio sismico, non era mai stata interessata in maniera così estesa da fenomeni di questo tipo. Nasce pertanto l'esigenza di proteggere il patrimonio storico e culturale italiano non solo da fenomeni di scuotimento ma anche da quelli di liquefazione.

La liquefazione si manifesta in sabbie sciolte sature: a causa di una sollecitazione sismica, questi terreni possono trovarsi in tempi rapidi in condizione non drenata con conseguente crescita di sovrappressioni neutre e annullamento delle tensioni efficaci. Come noto (Ishihara K., 1985), il grado di addensamento di una sabbia è il parametro fondamentale che regola l'innescio del fenomeno della liquefazione: per tale motivo le tecniche maggiormente impiegate per la mitigazione del rischio da liquefazione sono quelle che provocano un addensamento del terreno, ad esempio tramite vibro-compattazione o

compattazione dinamica. E' ben noto (Tanaka S. e Sasaki T., 1989) che queste tecniche difficilmente possono essere applicate in zone densamente urbanizzate o in siti in cui sono presenti edifici storici da tutelare. In queste condizioni è necessario intervenire con tecniche di mitigazione meno invasive che uniscano l'esigenza di ridurre il rischio da liquefazione con quella della tutela dell'integrità del patrimonio costruito. In questi contesti risultano particolarmente adatte le tecniche che prevedono la permeazione all'interno del terreno di miscele di nanoparticelle che non alterano la struttura del terreno.

Numerose evidenze sperimentali (Ishihara K. e Koseki J., 1989; Seed H. B. et al., 1983; Tokimatsu K. e Yoshimi Y., 1983; Ishihara K., 1993) hanno infatti dimostrato come l'introduzione di quantità controllate di particelle altamente plastiche, come possono essere la bentonite e la laponite, migliori la resistenza alla liquefazione dei terreni (El Mohtar C.S. et al., 2014).

Nel caso della laponite, anche in piccole percentuali (1-5% del peso secco di sabbia), l'efficacia del trattamento è legata a due meccanismi: la creazione di "ponti" tra le particelle di sabbia dovuti alla natura plastica della laponite, e la formazione di un fluido di porosità (gel) che nel tempo si comporta come un materiale dotato di una propria rigidità distorsionale, ancorché piccola (Huang

et al, 2016; Ochoa-Cornejo F. et al., 2016). Entrambi i meccanismi riducono la mobilità delle particelle di sabbia durante i cicli di carico, migliorando la resistenza a liquefazione.

Naturalmente l'aspetto delicato di questa tecnica è proprio l'applicazione in sito: l'iniettabilità delle miscele è fortemente legata alla loro viscosità iniziale μ e alla sua variazione nel tempo $\mu(t)$. Dal punto di vista ingegneristico, è necessario che il tempo di iniezione sia inferiore al tempo di gelificazione delle miscele, tempo che segna un brusco incremento della viscosità iniziale e quindi un rallentamento del processo di permeazione attraverso i pori del terreno.

L'articolo mostra i primi risultati di una ricerca sperimentale in corso presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II, svolta nell'ambito di un più ampio progetto europeo (LIQUEFACT), finalizzata allo studio della iniettabilità di miscele di laponite in depositi sabbiosi e della loro efficacia per la mitigazione del rischio da liquefazione.

2 I MATERIALI UTILIZZATI E IL PROGRAMMA SPERIMENTALE

2.1 Materiali

La sperimentazione è stata condotta su una sabbia monogranulare (Leighton Buzzard frazione E, Fig. 1), caratterizzata da una gravità specifica G_s pari a 2.65 ed un indice dei pori minimo e massimo (e_{min} ed e_{max}) rispettivamente pari a 0.613 e 1.014.

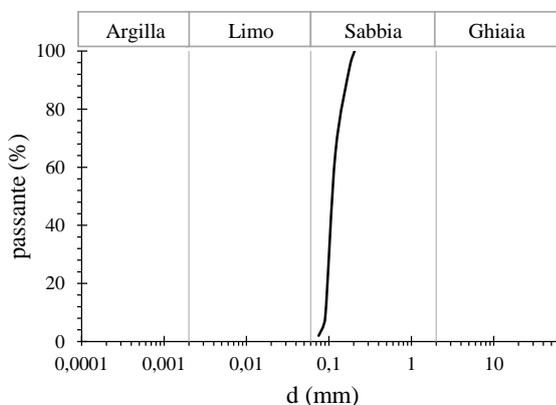


Figura 1 – Curva granulometrica della Leighton Buzzard, frazione E

La caratterizzazione della sabbia in campo statico è stata approfondita in studi precedenti (Visone C., 2008, Lanzano G. et al., 2016): sono quindi noti i parametri meccanici in condizioni di picco e di stato critico. In Tabella I sono riportati i valori di angolo di attrito, ϕ_{cv} , e di rapporto deviatorico, M , relativi alla condizione di stato critico. Nel piano di compressione e - $\ln p'$, la retta di stato critico (CSL) è caratterizzata da e_r pari a 0.9774 e λ pari a 0.0324 (Visone C., 2008).

Nel programma sperimentale è stata utilizzata la laponite RD ($Na_{+0.7}[(Si_8Mg_{5.5}Li_{0.3})O_{20}(OH)_4]_{-0.7}$), che è una nanoparticella sintetica utilizzata in diverse applicazioni, come la cosmetica o il restauro. La particella

di laponite ha una forma a disco con un diametro di 25 nm (dieci volte più piccolo di quello della bentonite), spessore di 1 nm e gravità specifica $G_s = 2.57$ (Rockwood Additives Ltd., 2011).

L'indice di plasticità I_p risulta molto elevato e pari a 1100%, e per tale ragione viene chiamata "nanoparticella super-plastica" (El Howayek et al., 2011). La laponite è una argilla colloidale costituita, essenzialmente, da una miscela di silicati di sodio e magnesio, con una struttura simile alla struttura della montmorillonite (Fig. 2). Le Laponiti posseggono numerose cariche negative sulla loro superficie che, nominalmente, sono legate al sodio (o magnesio) come controione (Huang Y. e Wang L., 2016).

Tabella I – Angolo di attrito e rapporto deviatorico in condizioni di stato critico (Visone 2008).

Compressione		Estensione	
ϕ_{cv} (°)	M_{cv}	ϕ_{cv} (°)	M_{cv}
33.4	1.35	31.4	-0.88

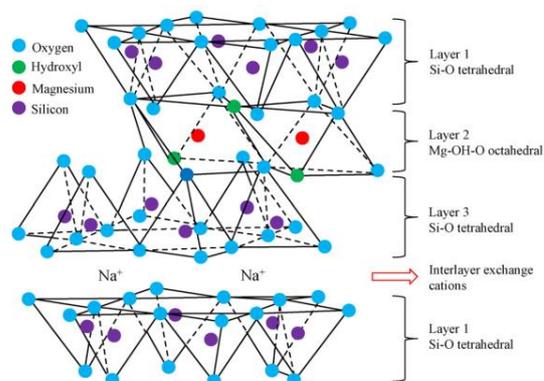


Figura 2 – Struttura della laponite (Huang Y. e Wang L., 2016)

Dal diagramma di fase della laponite RD (Fig. 3), in cui è rappresentata la percentuale di laponite C in acqua in funzione della forza ionica della miscela (che esprime la concentrazione di ioni in soluzione, in termini di concentrazione molare M), si può osservare che quando la laponite viene disciolta in acqua la miscela ha una viscosità molto simile a quella dell'acqua (punto A, Fig. 3). Nel tempo la laponite si idrata e rigonfia, formando un gel, passando per una fase transitoria (*Liquid-Sol*) nella quale la viscosità aumenta con una velocità che è funzione della concentrazione di laponite. La fase *Sol* (punto B) rappresenta il passaggio tra una soluzione fortemente acquosa e un *Attractive gel* (punto C). In questo campo la viscosità non dipende dalla percentuale di laponite, la quale invece incide sul tempo di gelificazione e sulle interazioni elettriche tra le molecole. Se la percentuale di laponite aumenta nel tempo, ad esempio in caso di essiccamento, si può passare a una fase solida simile ad un processo di vetrificazione che si divide in *Attractive* e *Repulsive Glass* (rispettivamente punti D ed E).

La concentrazione di laponite regola quindi lo stato (liquida o gel o solida) della miscela: per poter iniettare una miscela di laponite in un terreno è necessario che questa possa permeare senza modificare la struttura,

pertanto deve comportarsi come un liquido (fase *Liquid*, Fig. 3). Una volta che la miscela ha permeato in un volume definito di terreno, si avrà il passaggio dalla fase *Liquid* a quella *Attractive gel*, condizione in cui la miscela è in grado di migliorare la resistenza a liquefazione del terreno, limitando la mobilità delle particelle di sabbia.

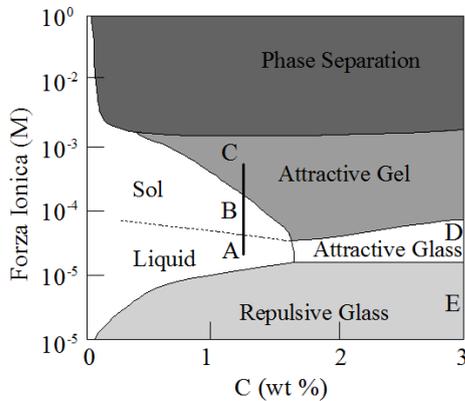


Figura 3 – Diagramma di fase della laponite RD (adattato da Santagata M., 2014)

2.2 Programma sperimentale

Il programma sperimentale è stato definito con l'obiettivo di verificare l'iniettabilità di miscele di laponite in sito (mediante prove di viscosità e di permeabilità) e l'efficacia di tali miscele nel ridurre il rischio di liquefazione della sabbia oggetto della sperimentazione (mediante prove triassiali cicliche).

2.2.1 Prove di viscosità

L'iniettabilità di una miscela acquosa in un terreno (Lirer et al., 2006) è certamente legata alle dimensioni delle particelle in sospensione, alla viscosità iniziale della miscela, e al suo tempo di gelificazione (tempo in cui si osserva un brusco incremento della viscosità iniziale).

Sono state condotte quattro prove di viscosità con il cono di Marsh su miscele di acqua/laponite preparate a due diverse concentrazioni (Tab. II), al fine di misurarne la viscosità iniziale μ ed il tempo di gelificazione. In due prove (PV3 e PV4) sono stati aggiunti degli additivi (SPP= pirofosfati di sodio) che consentono di annullare momentaneamente le cariche delle particelle di bentonite favorendone la permeazione attraverso il terreno.

Le miscele sottoposte alle prove di viscosità sono state realizzate unendo all'acqua la laponite secca (ed eventualmente SPP, Tab. II) agitando energicamente per favorire la solubilizzazione delle nanoparticelle.

La miscela acqua/laponite è una sospensione con una bassa viscosità iniziale μ : dopo un periodo di tempo - tempo di gelificazione - essa si trasforma in un gel ad alta viscosità.

Tabella II – Prove di viscosità

Prova	Fluido	Concentrazione lap (%)	Concentrazione SPP (%)
PV1	acqua+lap	1.5	-
PV2	acqua+lap	3	-
PV3	acqua+lap+SPP	3	0.06
PV4	acqua+lap+SPP	3	0.03

2.2.2 Prove di permeabilità

Le prove di permeabilità (Tab. III) sono state condotte a carico costante in un permeametro con un diametro pari a 35.3 mm ed un'altezza di 72 mm. Il provino di sabbia (densità relativa $D_r=40\%$) viene realizzato per pluviazione all'interno del permeametro, confinato da due piastre porose, opportunamente saturate.

Sono state eseguite cinque prove di permeabilità (Tab. III): una prima prova (PW) è stata realizzata per valutare la permeabilità della sabbia all'acqua, mentre le successive prove (PL1 e PL2) sono state realizzate sulla miscela acqua e laponite a due concentrazioni differenti. Le ultime due prove (PL3 e PL4) sono state eseguite utilizzando le miscele acqua/laponite con l'aggiunta di SPP.

Tabella III - Prove di permeabilità

Prova	Dr	Fluido	Concentrazione lap (%)	Concentrazione SPP (%)
PW	0.40	acqua	-	-
PL1	0.40	acqua+lap	1.5	-
PL2	0.40	acqua+lap	3	-
PL3	0.40	acqua+lap+SPP	3	0.06
PL4	0.40	acqua+lap+SPP	3	0.03

2.2.3 Prove triassiali cicliche

La liquefazione dei terreni viene studiata in laboratorio molto frequentemente attraverso prove triassiali cicliche non drenate (Seed H.B. e Lee K.L., Ishihara K., 1985, Flora et al., 2012, Flora et al., 2013). Tali prove sono condotte imponendo in condizione non drenata, dopo una fase iniziale di consolidazione, un rapporto di tensione ciclica CSR (*Cyclic Stress Ratio*) definito come il rapporto tra la tensione tangenziale τ_d e la tensione normale efficace σ'_{ref} che agisce sul piano inclinato a 45° rispetto al piano orizzontale:

$$CSR = \frac{\tau_d}{\sigma'_{ref}} = \frac{q_d}{2 \cdot \sigma'_{ref}} \quad (1)$$

dove q_d è la tensione deviatorica ciclica, definita come ($\sigma_a - \sigma_r$), ovvero la differenza tra la tensione assiale e quella radiale, mentre σ'_{ref} è pari a:

$$\sigma'_{ref} = \frac{\sigma'_{1,c} + \sigma'_{3,c}}{2} \quad (2)$$

in cui $\sigma'_{1,c}$ e $\sigma'_{3,c}$ sono rispettivamente la tensione principale massima e la minima che agiscono alla fine della fase di consolidazione.

Le prove triassiali cicliche sono state eseguite in una cella tipo Bishop & Wesley. Il programma di prove triassiali è descritto nella Tabella IV: sono state eseguite nove prove su provini di sola sabbia (S1-S9), e due su provini miscelati con la laponite. I provini di sabbia sono stati preparati per pluviazione a una densità relativa del 40% e congelati prima di essere disposti nella cella triassiale.

I provini con la laponite (SL1, SL2) sono stati realizzati

mescolando manualmente la sabbia e la laponite asciutte. La miscela sabbia/laponite è stata successivamente pluviata in una fustella d'acciaio e il provino così realizzato è stato poi congelato. La quantità di laponite aggiunta nel provino è pari all'1% rispetto al peso secco di sabbia, che corrisponde a una concentrazione in acqua del 3%.

Una volta messi in cella, tutti i provini vengono soggetti a una fase di scongelamento in condizione drenata applicando una tensione efficace di confinamento di 5kPa. Verificato il grado di saturazione ($B=98\%$), il provino viene quindi consolidato a diverse tensioni di consolidazione ($\sigma'_c=25-50-100\text{kPa}$, Tab. IV). Terminata la fase di consolidazione, si applica la tensione deviatorica ciclica q_d stabilita. Tra la fase di consolidazione e di carico ciclico intercorre un tempo definito di *aging*: tale tempo è uguale a un'ora per i provini non trattati, e pari a 110 ore per i provini trattati (Tab. IV). Tale tempo serve a garantire che la laponite gelifichi all'interno dei pori.

Il criterio adottato per l'innesco della liquefazione è una deformazione assiale ϵ_a pari al 5% e un indice R_u (*pore pressure ratio*) pari a 0.9, avendolo definito come il rapporto tra le sovrappressioni neutre Δu che si sviluppano durante la prova e la tensione di consolidazione applicata σ'_c ($R_u = \Delta u / \sigma'_c$).

Le prove cicliche sono state condotte applicando diversi valori di CSR al fine di ottenere la curva di resistenza ciclica della sabbia e della sabbia miscelata con la laponite.

Tabella IV – Prove triassiali cicliche

Prova	Fine	Fine (%)	D_r (%)	Aging (h)	σ'_c (kPa)	CSR	N_{Liq}
S1	-	-	47	1	25	0.115	12
S2	-	-	45	1	50	0.179	1.2
S3	-	-	55	1	50	0.128	12
S4	-	-	50	1	50	0.080	No
S5	-	-	47	1	50	0.109	14
S6	-	-	52	1	50	0.097	No
S7	-	-	55	1	50	0.147	4
S8	-	-	44	1	100	0.099	33
S9	-	-	45	1	100	0.197	1.1
SL1	lap	1	53	110	50	0.135	38
SL2	lap	1	57	110	50	0.162	6.1

3 RISULTATI SPERIMENTALI

3.1 Prove di viscosità

In figura 4 sono riportati i risultati delle prove di viscosità (Tab. II). Osservando le prove condotte sulle miscele senza additivi (PV1 e PV2), si evince che la viscosità iniziale è ovviamente funzione della concentrazione di laponite utilizzata. Una bassa concentrazione (1.5% in PV1) garantisce una viscosità iniziale di circa 1.5 cP. Si osserva inoltre che l'aggiunta di additivi (SPP) riesce a ridurre la viscosità iniziale anche nel caso di miscele a concentrazione maggiore (3%). In definitiva tre miscele su quattro (PV1, PV3 e PV4), hanno una viscosità bassa e simile a quella dell'acqua. Quando si raggiunge il tempo di gelificazione si ha un brusco incremento della viscosità delle miscele. Il tempo di gelificazione dipende, come prevedibile, significativamente dalla percentuale di laponite presente

nella miscela: esso risulta maggiore per la miscela con minore percentuale di laponite (PV1).

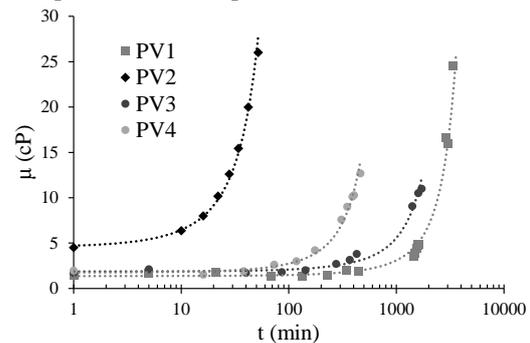


Figura 4 – Prove di viscosità a diverse concentrazioni di laponite, con e senza SPP

La presenza degli SPP (maggiore nella prova PV3) consente di ritardare il tempo di gelificazione della miscela acqua/laponite, favorendone così l'iniettabilità in sito.

3.2 Prove di permeabilità

La permeabilità del terreno ad una data miscela (k_m) dipende fortemente dalla viscosità del fluido che permea secondo la ben nota relazione:

$$k_m = \frac{\mu_w}{\mu_m} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_w} \cdot k \quad (3)$$

in cui μ_w e μ_m rappresentano rispettivamente la viscosità dell'acqua e della miscela, mentre γ_w e γ_m sono i pesi specifici dell'acqua e della miscela (per la miscela laponite si ha $\gamma_m=10.3 \text{ kN/m}^3$), infine k rappresenta la permeabilità del terreno all'acqua.

Le prove di permeabilità sono state condotte su provini di sabbia facendo variare la miscela da permeare nel provino (acqua, acqua/laponite e acqua/laponite con l'aggiunta di SPP). Il valore del coefficiente di permeabilità k della sabbia all'acqua, misurato con la prova PW (Fig. 5), risulta pari a $2.1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

Le prove PL1 e PL2 sono state condotte a diverse concentrazioni di laponite, rispettivamente 1.5% e 3% in acqua, che corrispondono a 0.5% e 1% di laponite in peso rispetto al secco di sabbia (Tab. III). Queste miscele hanno avuto difficoltà a permeare attraverso i provini e, per questa ragione, sono state effettuate altre prove di permeabilità (PL3 e PL4) aggiungendo alle miscele gli additivi. Come si osserva dalla figura 6, in queste prove le miscele sono riuscite a permeare: il coefficiente di permeabilità k_m misurato per entrambe le prove è risultato molto simile al valore della permeabilità all'acqua.

Durante le prove di permeabilità, sono stati prelevati dei campioni di miscela uscente dai provini per misurare la concentrazione di laponite in essa disciolta. Diagrammando la concentrazione nel tempo (Fig. 7) si osserva che nelle fasi iniziali delle prove PL3 e PL4, tale concentrazione è pari a 0 in quanto viene dapprima espulsa la sola acqua presente nel provino. Successivamente comincia a permeare la miscela acqua/laponite e la concentrazione di laponite nella

miscela cresce nel tempo fino a raggiungere il valore iniziale di preparazione (pari al 3%). Tale valore viene raggiunto dopo circa 20 minuti nella prova PL3 e 50 minuti nella prova PL4.

In Figura 8, sono riportati i valori del coefficiente di permeabilità k_m misurato durante la prova PL4 e quello calcolato attraverso l'equazione 3. Fino a quando la viscosità della miscela μ_m resta bassa e simile all'acqua, il valore di permeabilità calcolato è prossimo a quello misurato dalla prova di permeabilità. Successivamente il valore di permeabilità calcolato attraverso l'eq. 3 inizia a ridursi in quanto il valore di viscosità inizia a crescere (Fig. 4), mentre dalla prova di permeabilità il valore di k_m si mantiene ancora costante (Fig. 8).

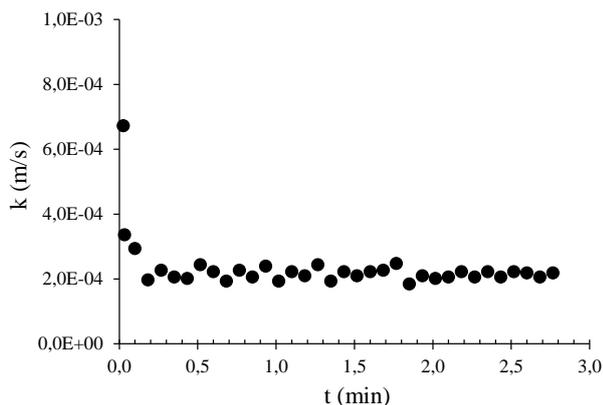


Figura 5 – Risultati della prova di permeabilità PW

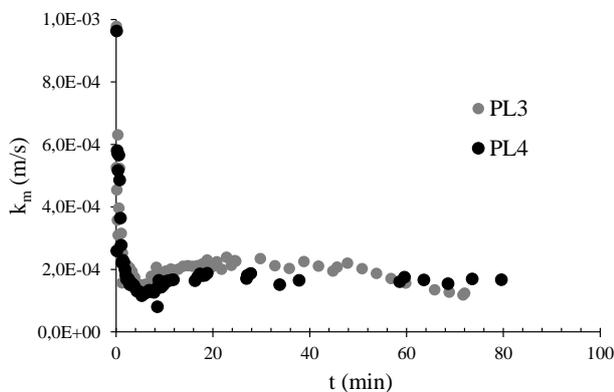


Figura 6 – Confronto delle prove di permeabilità PL3 e PL4

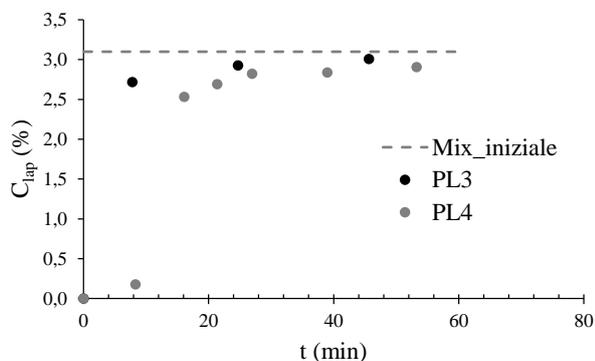


Figura 7 - Concentrazione nel tempo della miscela permeata nelle prove PL3 e PL4

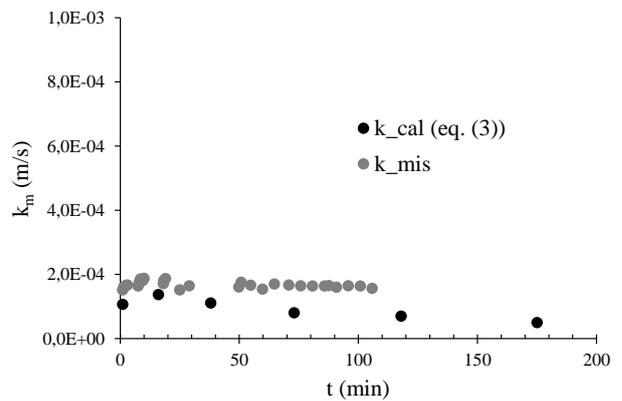


Figura 8 - Confronto tra la permeabilità misurata e calcolata (eq. 3) nella prova PL4

Ciò significa che durante la prova di permeabilità il tempo di gelificazione della miscela è maggiore rispetto a quello misurato durante la prova di viscosità. Ciò può essere dovuto al fatto che durante la permeazione nel provino la miscela è in movimento, mentre nelle prove di viscosità è ferma. Il continuo movimento della miscela può causare un ritardo del tempo di gelificazione.

3.3 Prove triassiali cicliche

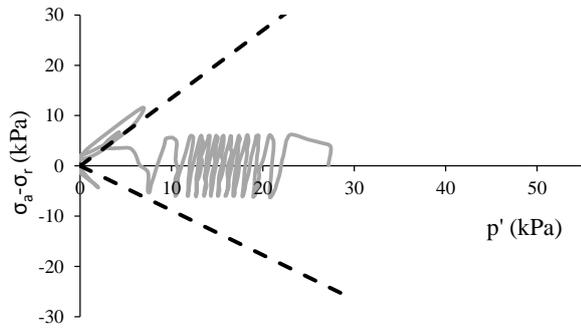
In Tabella IV sono sintetizzati i risultati di tutte le prove cicliche condotte sulla sabbia naturale e sulla sabbia trattata con laponite, in termini di CSR e N_{liq} (numero di cicli in cui si ha liquefazione).

Nelle figure 9 e 10, a titolo di esempio, sono riportati i risultati delle due prove S1 e S5 condotte sulla sabbia naturale nei due tradizionali piani: tensione deviatorica q - tensione media efficace p' e rapporto di tensione ciclica $CSR - N_{cyc} - R_u$.

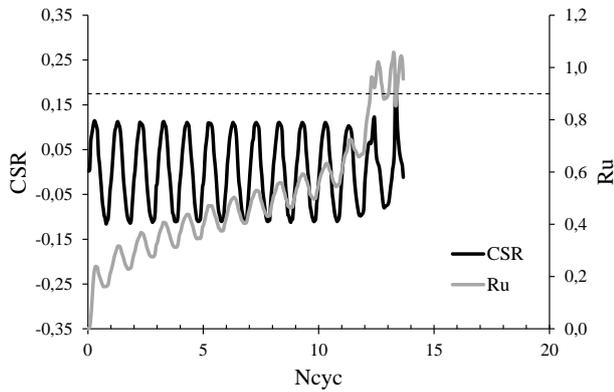
Si osserva per entrambe le prove (Fig. 9-10) che nel piano $q-p'$ i cicli si spostano verso l'origine degli assi fino a toccare l'involuppo di rottura. Per la prova S1 ($CSR=0.179$) la liquefazione si attinge per un numero di cicli pari a 12, quando il valore di R_u diventa pari a 0.9 (Fig. 9). Per la prova S5, eseguita con un valore di CSR inferiore ($CSR=0.109$, Fig. 10), la liquefazione si attinge dopo un numero di cicli maggiore e pari a 14.

In figura 11 sono riportati i risultati della prova ciclica condotta sul provino miscelato con la laponite SL1. In questo caso, per un valore di $CSR=0.135$, la liquefazione si attinge dopo circa 38 cicli.

Se si confrontano i risultati di questa prova con quelli della prova ciclica condotta sul provino di sabbia naturale S3, con un valore di CSR molto simile ($CSR=0.128$), si osserva una sostanziale diversità tra le prove SL1 e S3 nell'insorgere delle sovrappressioni neutre durante la fase ciclica (Fig. 12). Queste ultime crescono con ritardo rispetto a quanto accade per la sabbia non trattata e ciò comporta che le tensioni efficaci si annullino a un numero di cicli maggiore. Il ritardo nello sviluppo delle pressioni neutre può essere spiegato con una riduzione della mobilità dei grani di sabbia per la formazione di gel formato dalla laponite. Gli stessi risultati possono essere visti analizzando il valore di R_u con il numero di cicli adimensionalizzato rispetto a quello a cui è avvenuta la liquefazione (N_{cyc}/N_{liq}) (Fig. 13).

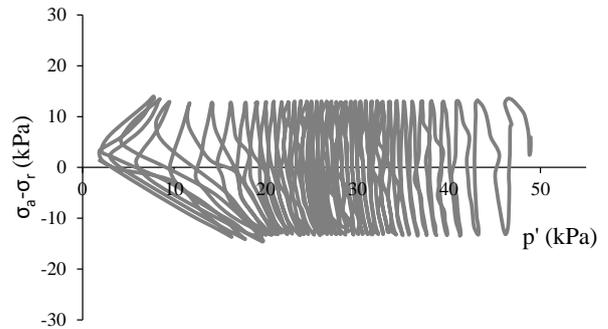


(a)

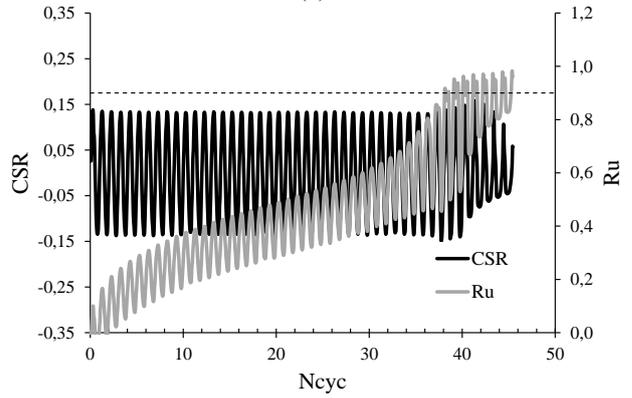


(b)

Figura 9 – Risultati della prova triassiale ciclica S1

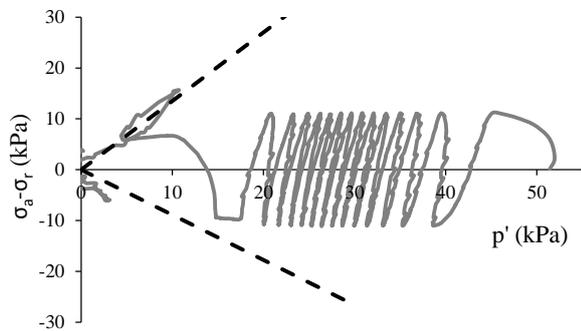


(a)

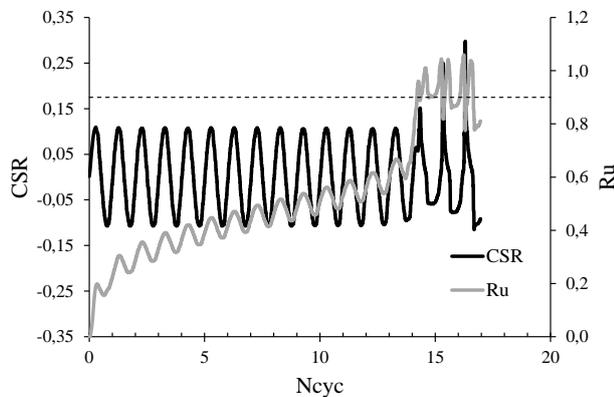


(b)

Figura 11 - Risultati della prova triassiale ciclica SL1



(a)



(b)

Figura 10 – Risultati della prova triassiale ciclica S5

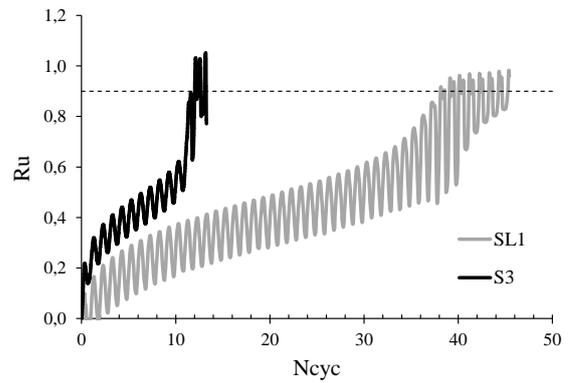


Figura 12 – Confronto tra le prove S3 e SL1 in termini di R_u col numero di cicli N_{cyc}

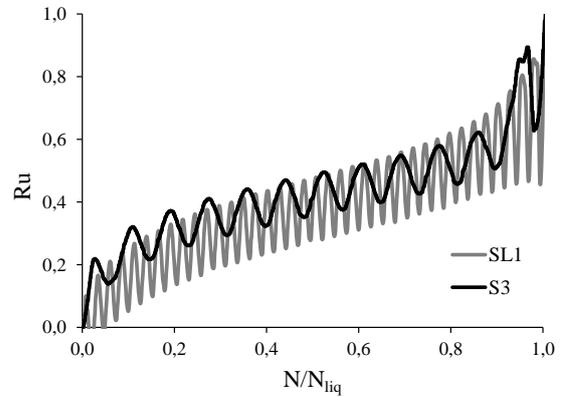


Figura 13 – Indice R_u in funzione del numero di cicli adimensionalizzato N_{cyc}/N_{liq}

Il valore picco-picco delle Δu a ogni ciclo viene chiamato U_{cyc} , mentre si definisce U_{mean} il valore medio di Δu che si ottiene a ogni ciclo di carico (El Mohtar C.S., 2013). Nel caso di un provino con la laponite nonostante si abbiano valori di U_{cyc} maggiori rispetto a quelli della sabbia naturale, la U_{mean} è inferiore. E' proprio quest'ultima che regola il fenomeno della liquefazione, perché è la U_{mean} che determina l'annullamento delle tensioni efficaci. Le Δu ciclano attorno a un valore medio più basso nella sabbia miscelata con la laponite ma con ampiezze maggiori rispetto al terreno non trattato.

Dalla figura 13 emerge come inizialmente la "R_u media", ovvero relativa a U_{mean} della prova S3 (e analogamente nelle prove S1 e S5) sia maggiore rispetto a quella della prova SL1, ma si avvicinano quando il rapporto N_{cyc}/N_{liq} arriva ad 1, questo esprime come la presenza della laponite nel terreno incrementa la resistenza a liquefazione di una sabbia non trattata e lo fa principalmente ad un numero di cicli minore.

4 CURVE DI RESISTENZA CICLICA

La curva di resistenza ciclica di un terreno rappresenta il legame tra il rapporto di resistenza ciclica CRR (*cyclic resistance ratio*), definito come il rapporto di tensione ciclica CSR che causa liquefazione a un numero finito di cicli di carico, e il numero di cicli in cui si verifica la liquefazione N_{liq} . Tipicamente, le curve di resistenza ciclica si riferiscono ad un determinato stato tensionale di confinamento. Nel caso delle prove condotte (Tab. IV) in questo studio, eseguite su provini con differenti condizioni iniziali di tensione e di addensamento, si farà riferimento anche al ben noto parametro di stato ψ di Jefferies (Jefferies M.G. e Been K., 2006), definito come:

$$\psi = e - e_{cs} \quad (4)$$

in cui e è l'indice dei vuoti del provino a una data tensione di confinamento p' , e e_{cs} è l'indice dei vuoti che si legge sulla curva di stato critico CSL alla stessa tensione di confinamento.

In Tabella V, sono riportati i valori di ψ per le sette prove condotte sulla sabbia che hanno raggiunto la liquefazione: il valore di e rappresenta l'indice dei vuoti raggiunto a fine consolidazione, il valore di e_{cs} è stato calcolato sulla curva di stato critico di letteratura (Visone C., 2008). Dalla tabella V, si osserva che i valori di ψ delle prove condotte sulla sola sabbia sono molto simili, ad eccezione delle due prove condotte a tensione di confinamento maggiore (S8 e S9). Non avendo ancora svolto una caratterizzazione approfondita in campo statico per la sabbia miscelata con la laponite, per le prove SL1 e SL2, non è stato possibile calcolare il parametro ψ .

I risultati delle prove eseguite sulla sabbia naturale e sulla sabbia miscelata con la laponite sono riportati in Fig. 14 nel piano CRR- N_{liq} . E' possibile individuare un'unica curva di resistenza ciclica ($SN_{CRR-N_{liq}}$) per i provini di sabbia naturale consolidati a bassi stati tensionali (25-50 kPa) che hanno anche un valore di ψ molto simile. Tale curva è stata interpretata adottando la relazione proposta

da Chiaradonna et al. (2016). Per i provini consolidati a 100 kPa (S8 e S9), non si può definire univocamente una curva di resistenza ciclica, anche se essi sembrano essere molto prossimi alla curva $SN_{CRR-N_{liq}}$. Si può osservare chiaramente che i punti pertinenti alle prove condotte sui provini di sabbia e laponite (SL1 e SL2) sono al di sopra della curva $SN_{CRR-N_{liq}}$, e quindi ciò prova che la presenza della laponite (anche se in piccole quantità), determina certamente un miglioramento della resistenza ciclica a liquefazione della sabbia.

Tabella V – Valori di ψ nelle prove di sabbia non trattata

Prova	p' (kPa)	e	ψ	CSR	N_{liq}
S1	25	0.825	-0.048	0.115	12
S2	50	0.835	-0.016	0.179	1.2
S3	50	0.794	-0.057	0.128	12
S5	50	0.824	-0.027	0.109	14
S7	50	0.792	-0.059	0.147	4
S8	100	0.837	0.009	0.099	33
S9	100	0.832	0.004	0.197	1.1

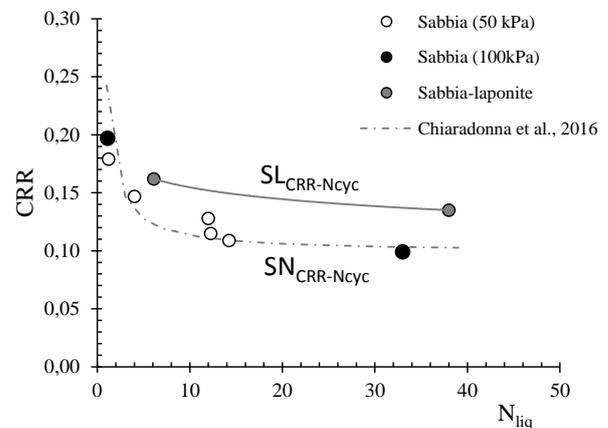


Figura 14 – Curve di resistenza ciclica per la sabbia naturale ($SN_{CRR-N_{liq}}$) e per la sabbia miscelata con la laponite ($SL_{CRR-N_{liq}}$)

5 OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

Le prove di viscosità e di permeabilità condotte su differenti miscele di laponite, anche con l'impiego di additivi, hanno dimostrato che grazie alla bassa viscosità iniziale (confrontabile con quella dell'acqua), tali miscele possono permeare all'interno dei pori del terreno senza modificarne la struttura.

I risultati delle prove triassiali cicliche hanno confermato inoltre che la laponite è in grado di aumentare la resistenza alla liquefazione della sabbia: la presenza di un gel di laponite all'interno dei pori limita la mobilità dei grani di sabbia e quindi ritarda, in maniera anche significativa, l'innesco del processo di liquefazione.

La sperimentazione è ancora in corso ed è volta ad una maggiore comprensione dei meccanismi di interazione tra il fluido di porosità e i granelli di terreno, responsabili del fenomeno della liquefazione.

BIBLIOGRAFIA

Chiaradonna A., Tropeano G., d'Onofrio A., Silvestri F. 2016. A

- simplified method for pore pressure buildup prediction: from laboratory cyclic tests to the 1D soil response analysis in effective stress conditions*. Procedia Engineering, Volume 158, 2016, Pages 302-307.
- Reid M.E., 1997. *Slope instability caused by small variation in hydraulic conductivity*. Journal of Geotechnical Engineering, 123 (8), 717-725.
- El Howayek A., 2011. *Characterization, rheology and microstructure of laponite suspension*. MS Thesis, School of Civil Eng., Purdue University.
- El Mohtar C.S., Bobet A., Drnevich V.P., Johnston C.T., Santagata M.C., 2014. *Pore pressure generation in sand with bentonite: from small strains to liquefaction*. Gèotechnique, 64 (2), 108-107.
- El Mohtar C.S., Bobet A., Santagata M.C., Drnevich V.P., Johnston C.T., 2013. *Liquefaction mitigation using bentonite suspensions*. ASCE J of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139 (8), 1369-1380.
- Flora A., Lirer S., Silvestri F. 2012. *Undrained cyclic resistance of undisturbed gravelly soils*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 43, 366-379.
- Flora A., & Lirer S., 2013. *Small strain shear modulus of undisturbed gravelly soils during undrained cyclic triaxial tests*. Geotechnical and Geological Engineering, vol. 31 (4), 1107-1222.
- Huang Y. e Wang L., 2016. Laboratory investigation of liquefaction mitigation in silty sand using laponite. Engineering Geology, 204, 23-32.
- Huang T., Huang A., Kuo Y., Tsai M., 2004. *A laboratory study on the undrained strength of a silty sand from Central Western Taiwan*. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 24 (9-10), 733-743.
- Ishihara K., 1985. *Stability of Natural Deposits*. During Earthquakes, Proc. of the 11th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., 1, San Francisco, 321-376.
- Ishihara K. and Koseki J., 1989. *Discussion of cyclic shear strength of fines-containing sands*. Proc., 12th Int. Conf. on Soil Mech. Geotech. Eng., London, 101-106.
- Ishihara K., 1993. *Liquefaction and flow failure during earthquakes*. Geotechnique, 43 (3), 351-415.
- Lanzano G., Visone C., Bilotta E., Santucci de Magistris F. (2016). *Experimental assessment of the stress-strain behaviour of Leighton Buzzard sand for the calibration of a constitutive model*. Geotechnical and Geological Engineering. 34:991-1012.
- Lirer S., Flora A., Verdolotti L., Lavorgna M., Iannace S., 2006. *Permeation grouting of fine grained pyroclastic soils and rocks*. Ground Improvement, 10: 135-177.
- Jefferies M.G., Been K., 2006. *Soil liquefaction- a critical state approach*. Taylor and Francis Ed.
- Lombardi D. e Bhattacharya S., 2014. *Liquefaction of soil in the Emilia-Romagna region after the 2012 Northern Italy earthquake sequence*. Natural Hazards, 73 (3), 1749-1770.
- Ochoa-Cornejo F., Bobet A., Johnston C. T., Santagata M., Sinfield J. V., 2016. *Cyclic behaviour and pore pressure generation in sands with laponite, a super-plastic nanoparticle*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 88, 265-279.
- Rockwood Additives Ltd. 2011. Laponite performance additives. Specification sheet.
- Santagata M., Bobet A., El Howayek A., Ochoa-Cornejo F., Sinfield J.V., Johnston C.T., 2014. *Building a nanostructure in the pore fluid of granular soils*. In: Soga K., Kumar K., Biscontin G., Kuo M. (eds.) Geomechanics from Micro Macro. 1377-1383.
- Santagata M., Clarke J., Bobet A., Drnevich V.P., El Mohtar C.S., Huang P., Johnston C.T., 2014. *Rheology of concentrated bentonite dispersions treated with sodium pyrophosphate for application in mitigating earthquake-induced liquefaction*. Applied Clay Science, 99, 24-34.
- Seed H.B. e Lee K.L., 1966. *Liquefaction of saturated sands during cyclic loading*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 92 (6), 105-134.
- Seed H. B., Idriss I.M., Arango I., 1983. *Evaluation of liquefaction potential using field performance data*. Journal of Geotechnical Engineering, 109 (3), 458-482.
- Seed H. B. e Idriss I.M., 1982. *Ground motion and soil liquefaction during earthquake*. EERI, Berkeley, California.
- Tan F. S. C., 1990. *Centrifuge and theoretical modelling of conical footings on sand*. PhD Thesis, Cambridge University, Cambridge, UK
- Tanaka S. e Sasaki T., 1989. *Sandy ground improvement for liquefaction at Noshiro Thermal Power Station*. Soil and Foundations, Vol 37, No 3, 86-90.
- Tokimatsu K. and Yoshimi Y., 1983. *Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content*. Soils and Foundations, 23 (4), 56-74.
- Visone C., 2008. *Performance-based approach in seismic design of embedded retaining walls*. PhD Thesis, University of Napoli Federico II, Napoli, Italy

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato condotto nell'ambito del progetto LIQUEFACT, finanziato dall'Unione Europea. LIQUEFACT project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 700748.



ABSTRACT

MITIGATION OF THE LIQUEFACTION SUSCEPTIBILITY OF LOOSE SANDS WITH INJECTIONS OF PLASTIC MIXTURES: FIRST EXPERIMENTAL RESULTS

Keywords: soil liquefaction; ground improvement; cyclic resistance curve

The recent earthquake that hit Italy have shown that the built heritage is at risk not only because of inertial and kinematic stresses induced by shaking directly on the structure, but also because of possible soil liquefaction phenomena. The techniques generally employed to mitigate the susceptibility to liquefaction in the case of new constructions (for example, vibrocompaction, dynamic compaction, etc.), are generally not applicable for existing buildings. As part of a large European project (LIQUEFACT), the University of Naples has launched an experimental study that aims to implement innovative soil improvement techniques for risk mitigation by liquefaction in densely built urban environments. Among these, the effectiveness of the use of mixtures with (natural or artificial) fine particles in suspension to be injected directly in the ground will be studied. The paper presents the preliminary results of the ongoing research that analyzed the injectability and effectiveness of mixtures of laponite.