

## **INFLUENZA DEL FINE NON PLASTICO SUL COMPORTAMENTO NON DRENATO CICLICO DI SABBIE LIMOSE**

Daniela Porcino

*Università Mediterranea di Reggio Calabria*

*daniela.porcino@unirc.it*

Valentina Diano

*Università Mediterranea di Reggio Calabria*

*valentina.diano@unirc.it*

### **Sommario**

La nota si inquadra in una più ampia ricerca in corso all'Università Mediterranea di Reggio Calabria, riguardante uno studio teorico-sperimentale sul comportamento in condizioni di sollecitazione statica e ciclica di sabbie contenenti fine di natura non plastica. La nota riporta i risultati ottenuti da prove non drenate di taglio semplice cicliche condotte su provini ricostituiti di sabbie limose caratterizzate da diverse percentuali di fine non plastico, considerando un valore costante dell'indice dei vuoti globale per tutte le prove. I risultati sono stati analizzati sia in termini di modelli di generazione delle sovrappressioni interstiziali indotte durante la sollecitazione ciclica, che in termini di resistenza alla liquefazione ciclica.

### **1. Introduzione**

Numerosi eventi sismici che si sono verificati nell'ultimo decennio in diversi paesi (Taiwan, 1999; Giappone, 2011; Nuova Zelanda, 2011; Italia, 2012) hanno evidenziato come le sabbie limose con fine non plastico o poco plastico possano essere considerati liquefacibili. Un aspetto rilevante da evidenziare è che per questo tipo di materiali non sono disponibili o comunque sono limitate le correlazioni empiriche basate sui risultati di prove in situ, per la determinazione della resistenza alla liquefazione, in quanto le correlazioni esistenti sono state generalmente sviluppate per sabbie contenenti fine di natura plastica.

Lo studio del comportamento non drenato ciclico di tali materiali ha, pertanto, ricevuto un notevole interesse come dimostrato dagli studi condotti in laboratorio su provini ricostituiti di sabbia contenenti diverse percentuali di fine non plastico, utilizzando l'apparecchiatura triassiale ciclica, mantenendo costanti i parametri che possono influenzare il loro comportamento, quali: densità relativa, indice dei vuoti globale e indice dei vuoti della matrice sabbiosa, indice dei vuoti equivalente (Thevanayagam, 2000; Thevanayagam et al, 2002; Amini e Qi, 2000; Polito e Martin, 2001; Xenaki e Athanasopoulos, 2003; Ravishankar, 2006; Sadek e Saleh 2007; Dash e Sitharam 2009; Rahman, 2009). Tuttavia, non si è tuttora pervenuti ad una completa ed organica comprensione di tutti gli aspetti che possono influenzare il loro comportamento in presenza di sollecitazioni sismiche. La presente nota si propone

quindi, di fornire un contributo allo studio dell'influenza del fine non plastico sul comportamento non drenato di sabbie limose in presenza di sollecitazioni di taglio semplice cicliche.

## 2. Materiali utilizzati e procedura di prova

L'apparecchiatura utilizzata per l'esecuzione delle prove è l'apparecchiatura di taglio semplice ciclico, modello Geonor/NGI, opportunamente modificata per l'esecuzione di prove non drenate cicliche a controllo di carico e di deformazione (Porcino et al., 2006). La sabbia pulita di base utilizzata è la sabbia silicea del Ticino ( $D_{50}=0.56$  mm,  $G_{ss}=2.68$ ), mentre il fine è di natura non plastica di origine silicea ( $d_{50}=0.025$  mm,  $G_{sf}=2.72$ ). In figura 1 si riportano le curve granulometriche dei materiali utilizzati. Le prove sono state condotte ricostituendo i provini di sabbia con differenti percentuali di fine non plastico comprese tra 0% e 40%, attraverso il metodo della compattazione umida a strati (“ moist tamping” ) (Ladd,1978; Chan,1985; Vaid et al.1999). Per le varie miscele di sabbia con differenti percentuali di fine sono stati determinati sia l'indice dei vuoti massimo ( $e_{max}$ ) secondo la norma ASTM D 4254, che l'indice dei vuoti minimo ( $e_{min}$ ) in accordo con le norme ASTM D 4253 (prova con tavola vibrante) e ASTM D 1557 (prova proctor modificata). I provini sono stati ricostituiti ad un prefissato valore di indice dei vuoti globale “ $e$ ” pari a 0.68 e poi consolidati ad una tensione verticale efficace  $\sigma'_{vo}$  pari a 100 kPa.

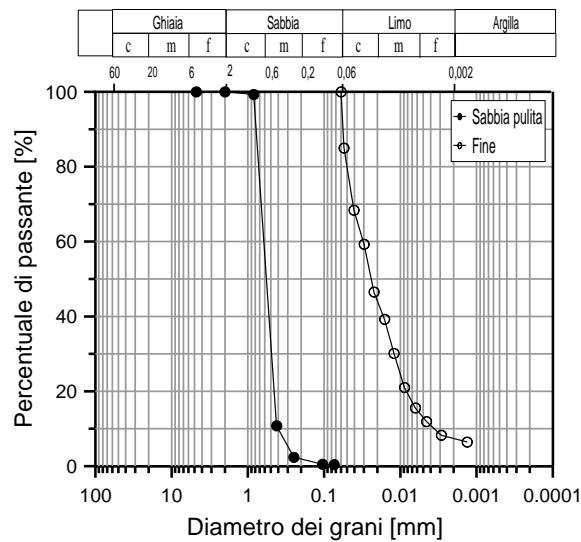


Fig 1. Curve granulometriche dei materiali utilizzati.

## 3. Comportamento non drenato ciclico di sabbie limose

La figura 2 riporta le curve tensioni tangenziali( $\tau$ )-deformazioni angolari ( $\gamma$ ) ricavate dalle prove non drenate di taglio semplice cicliche condotte ad un stesso valore del rapporto tensionale ciclico ( $CSR = \tau_{cyclic}/\sigma'_{vo} = 0.10$ ) su provini di sabbia con differenti percentuali di fine: 0%, 10%, 20%, 30% e 35%. Le prove sono state spinte fino al raggiungimento di una deformazione angolare ciclica in singola ampiezza  $\gamma_{SA}=3.75\%$ , generalmente assunto come condizione di liquefazione iniziale.

Appare evidente come, a parità di sollecitazione ciclica applicata, all'aumentare della percentuale di fine sino ad un valore di  $FC=30\%$ , la condizione di liquefazione iniziale sia raggiunta in un numero di cicli sempre più basso, con conseguente maggiore suscettibilità alla liquefazione. Superata tale soglia di fine, si riscontra una tendenza opposta.

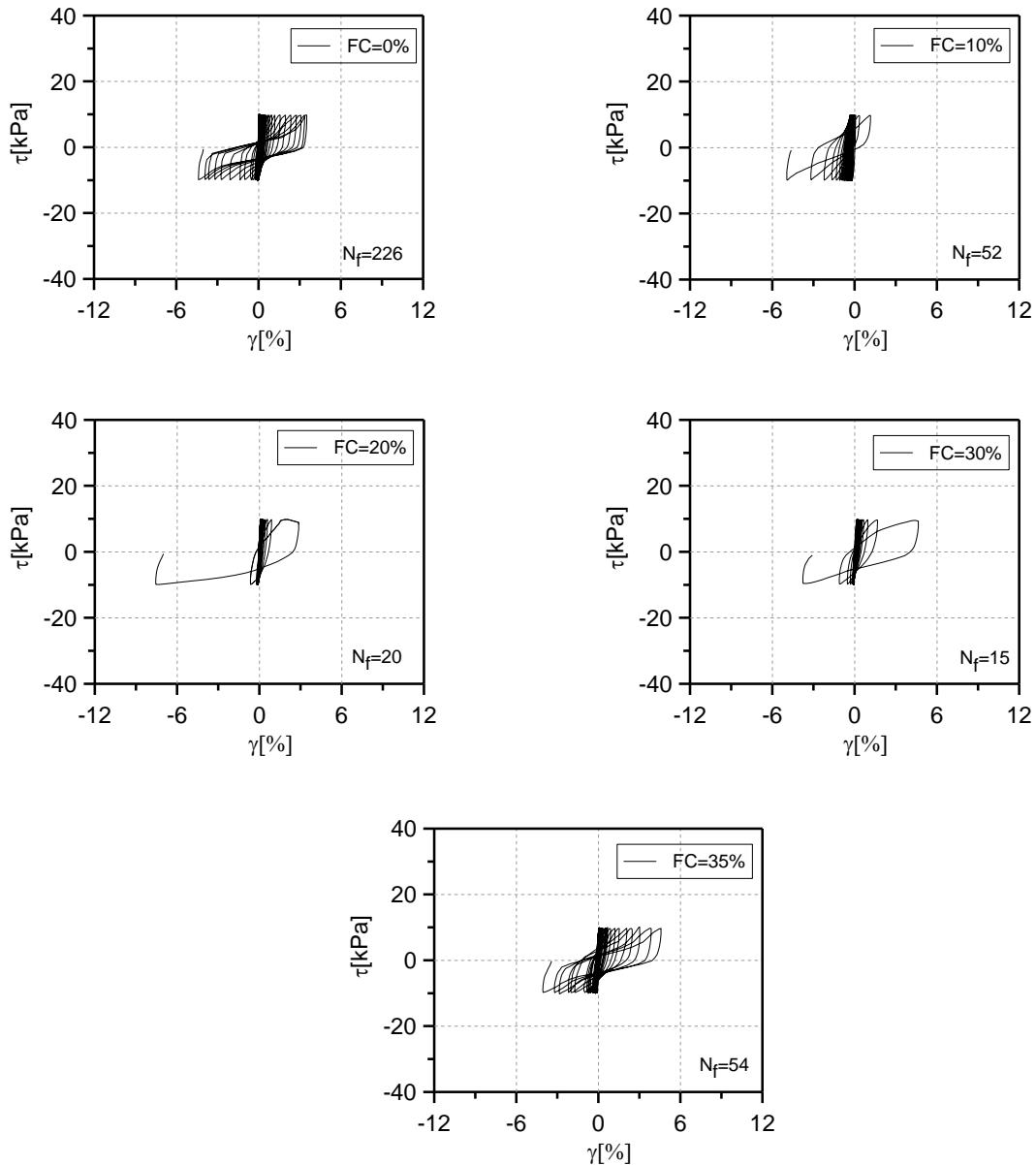


Fig 2. Comportamento non drenato ciclico della sabbia del Ticino con differenti percentuali di fine non plastico ( $e=0.68$ ,  $CSR=0.10$ ,  $\sigma'_{vo} = 100$  kPa).

In figura 3a) vengono riportati gli andamenti, al procedere del numero dei cicli, del rapporto delle sovrappressioni interstiziali cicliche  $R_u$  ( $\Delta u/\sigma'_{vo}$ ), corrispondenti alle medesime prove mostrate in fig.2. Come si può osservare, per un prefissato valore di  $N_c$ ,  $R_{u,max}$  raggiunto tende ad aumentare con la percentuale di fine (maggiore compressibilità) fino al raggiungimento di una soglia limite di  $FC$ , superata la quale un ulteriore aumento di fine ( $FC>30\%$ ) comporta una riduzione dei valori di  $R_u$ .

Al fine di esaminare l'influenza del fine non plastico sul modello di generazione delle sovrappressioni interstiziali cicliche esibito dalle sabbie limose, i valori di  $R_{u,residuo}$  (determinati in corrispondenza dell'annullamento delle tensioni tangenziali cicliche) sono stati riportati in funzione del numero di cicli normalizzato a quello corrispondente alla condizione di liquefazione ( $N_c/N_f$ ) (fig. 3b). Questa forma di rappresentazione  $R_u=f(N_c/N_f)$  viene generalmente utilizzata nei modelli di generazione delle sovrappressioni interstiziali proposti in letteratura per le sabbie (“stress-based models”).

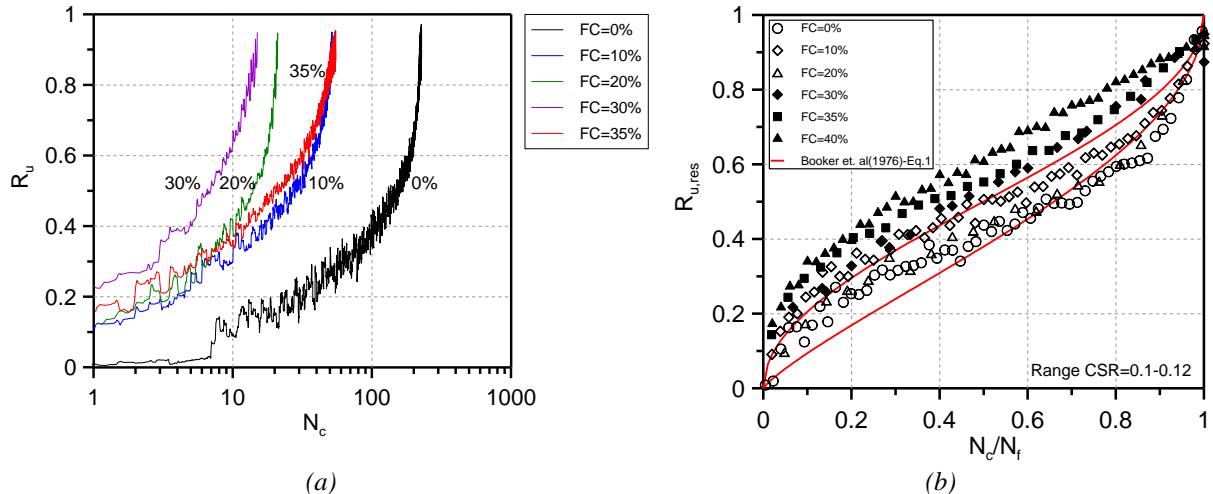


Fig. 3. Influenza della percentuale di fine non plastico sullo sviluppo delle sovrappressioni interstiziali cicliche in funzione(a) del numero di cicli ( $N_c$ ) e (b) del numero di cicli normalizzato ( $N_c/N_f$ ) ( $e=0.68$ , Range CSR=0.1-0.12,  $\sigma'_{vo} = 100$  kPa).

E' evidente come la normalizzazione consenta di unificare il comportamento in termini di  $R_u$ , indipendentemente dalla percentuale di fine. Con l'intento di verificare, inoltre, l'applicabilità dei modelli di generazione delle sovrappressioni interstiziali cicliche proposte per sabbie pulite anche a sabbie contenenti diverse percentuali di fine, si è fatto riferimento al modello di generazione proposto da Seed et al. (1975), successivamente semplificato da Booker et al. (1976) nella forma:

$$R_{u,residuo} = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left[ \left( \frac{N_c}{N_f} \right)^{\frac{1}{2\theta}} \right] \quad (1)$$

dove  $\theta$  è un parametro che varia in un intervallo di valori suggerito tra 0.6 e 1, e risulta dipendente sia dalle caratteristiche dei materiali utilizzati che dalle condizioni di prova.

Si osserva (fig. 3b) come il modello colga i dati sperimentali per percentuali di fine comprese tra FC=0% e FC=20%, infatti i punti sperimentali si collocano in buona parte all'interno della banda suggerita dagli autori. Viceversa, per sabbie con maggiore contenuto di fine (FC>30%), i punti sperimentali si collocano al di sopra della curva limite superiore del modello ed il parametro  $\theta$  assume valori maggiori di 1, in accordo con quanto riscontrato anche in precedenti studi (Bazier et al., 2011). In tal caso, pertanto, il modello di Booker et al. (1976) non consente di prevedere in maniera soddisfacente la risposta di sabbie limose in termini di generazione delle sovrappressioni interstiziali durante eventi sismici, e si rende necessario ricorrere a modelli specificatamente calibrati per sabbie con elevate percentuali di fine.

#### 4. Curve di resistenza alla liquefazione ciclica

L'influenza del fine sulla resistenza alla liquefazione ciclica è mostrata in figura 4 in termini di curve di resistenza alla liquefazione ciclica, in cui il rapporto tensionale ciclico (CSR) è rappresentato in funzione del numero di cicli a liquefazione. Al fine di individuare in maniera più evidente la soglia limite di FC oltre la quale si verifica un cambiamento in termini di comportamento non drenato ciclico di tali materiali, in figura 5 sono riportati il numero di cicli a liquefazione  $N_f$  in funzione della percentuale di fine per prove condotte ad ugual rapporto tensionale ciclico CSR=0.10.

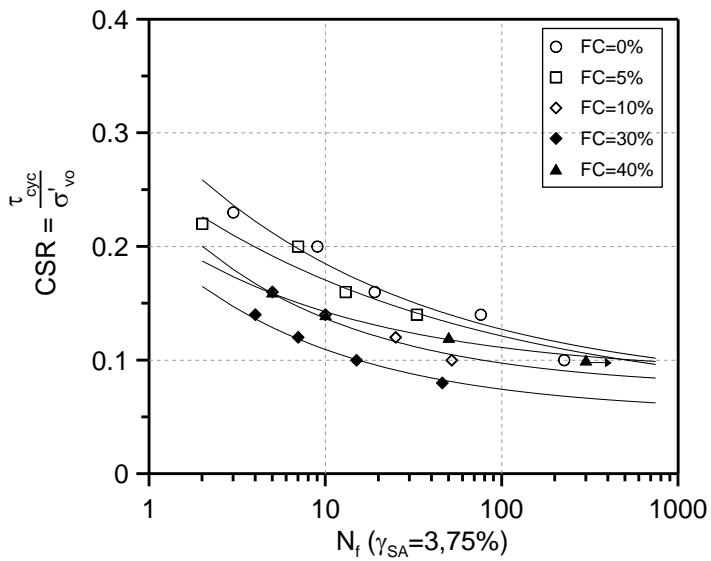


Fig. 4. Curve di resistenza alla liquefazione ciclica per sabbie limose con differenti valori di FC ( $e=0.68$ ).

Tale soglia limite di fine indicata con “LFC” può essere individuata per il caso in esame nell’intervallo di FC=20-30%: superata tale soglia, infatti, un ulteriore aumento del contenuto di fine, comporta un significativo aumento di  $N_f$ . In particolare, LFC rappresenta la percentuale di fine al di sotto della quale la struttura del terreno è costituita da particelle di limo contenute all’interno di una matrice sabbiosa ed al di sopra della quale la struttura è prevalentemente costituita da granelli di sabbia quasi “sospesi” in una matrice limosa con pochi contatti tra i granelli di sabbia. In letteratura sono state proposte diverse espressioni teoriche per una stima iniziale di LFC (Harzibaba,2005; Rahman et al.,2009) che richiedono la conoscenza delle caratteristiche fisiche della sabbia pulita e del fine, quali:  $D_{10}/d_{50}$  (rapporto tra il diametro corrispondente al 10% di passante della sabbia pulita e il diametro corrispondente al 50% di passante del fine),  $e_{f,max}$  (indice dei vuoti massimo del fine),  $e_{s,max}$  (indice dei vuoti massimo della sabbia pulita),  $G_{ss}$  (peso specifico della sabbia pulita),  $G_{sf}$  (peso specifico del fine). Facendo riferimento all’ espressione utilizzata da Harzibaba (2005), è stato valutato per i materiali investigati nella presente ricerca il valore di LFC:

$$LFC = \frac{G_{sf} \cdot e_{s,max}}{G_{sf} \cdot e_{s,max} + G_{ss}(1+e_{f,max})} = 23\% \quad (2)$$

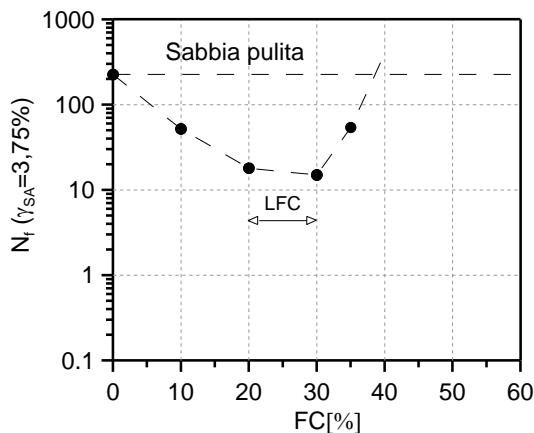


Fig. 5. Individuazione del contenuto limite di fine (LFC) per le sabbie limose investigative ( $e=0.68$ ,  $CSR=0.10$ ).

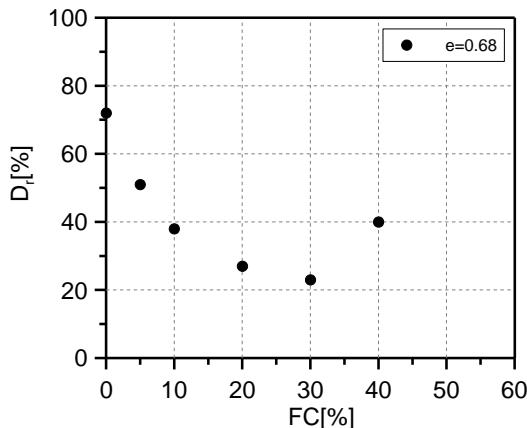


Fig 6. Variazione dello stato di addensamento iniziale con la percentuale di fine presente nelle sabbie limose ( $e=0.68$ ).

Tale valore è in buon accordo con quello ricavato sperimentalmente attraverso l'analisi della figura 5. I risultati ottenuti (figure 4 e 5) possono essere spiegati considerando la variazione dei valori di  $e_{min}$  ed  $e_{max}$  delle miscele di sabbie limose con la percentuale di fine, ed una conseguente variazione dello stato di addensamento iniziale dei materiali, come mostrato in figura 6. Tali evidenze sperimentali sono in buon accordo con quanto ricavato da diversi autori in precedenti studi (Polito and Martin 2001, Xenaki and Athanasopoulos 2003, Ravishankar 2006, Dash e Sitharam, 2009).

## 5. Conclusioni

I risultati di prove non drenate di taglio semplice cicliche condotte su provini ricostituiti di sabbie limose caratterizzate da diverse percentuali di fine non plastico, mostrano come esista una soglia limite di fine (nell'intervallo compreso tra  $FC=20\%-30\%$ ) che segna un passaggio di comportamento nella resistenza non drenata ciclica: in particolare, per percentuali di fine minori di tale soglia, le sabbie limose risultano più suscettibili alla liquefazione delle corrispondenti sabbie pulite con un significativo incremento delle sovrappressioni interstiziali cicliche.

Inoltre, in accordo con quanto osservato sperimentalmente anche da altri autori, i modelli di generazione delle sovrappressioni interstiziali cicliche tradizionalmente proposti in letteratura per sabbie pulite (Booker et al., 1976) appaiono poco applicabili a sabbie contenenti una percentuale di fine non plastico superiore al 30%. Gli sviluppi futuri della ricerca riguarderanno l'inquadramento teorico del comportamento di tali materiali in una cornice unitaria, capace di unificare la loro risposta in presenza di sollecitazioni sismiche applicate, indipendentemente dalla percentuale di fine presente (Thevanayagam et al. 2002; Raman et al., 2014).

## Bibliografia (Riferimenti principali)

- Baziar M.H, Shahnazari H., and Sharafi H. (2011). "A laboratory study on the pore pressure generation model for Firouzkoooh silty sands using hollow torsional test", *Int. J. Civil Eng.*, 9, 126-134.
- Booker J. R., Rahman M. S., and Seed H. B. (1976). GADFLEA—a computer program for the analysis of pore pressure generation and dissipation during cyclic or earthquake loading. Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Ca.
- Dash HK, Sitharam TG. (2009). "Undrained cyclic pore pressure response of sand-silt mixtures: effect of non plastic fines and other parameters", *J. Geotech. Geolog. Eng.*, 27, 501-517.
- Hazirbaba K. (2005). Pore Pressure Generation Characteristics of Sands and Silty Sands: a strain approach. Ph.D. Thesis, University of Texas, Austin, TX.
- Ladd R.S. (1978). "Preparing test specimens using undercompaction", *Geotech. Test. J.*, 1, 16-23.
- Polito C.P., and Martin J.R. (2001). "Effects of non plastic fines on the liquefaction resistance of sands", *J. Geotech. Geoenvir. Eng.*, 127, 408-415.