

INTERPRETAZIONE ENERGETICA DI PROVE TRIASSIALI CICLICHE SU SABBIE SCIOLTE IN CONDIZIONE DI PARZIALE SATURAZIONE

Lucia Mele

*Università degli Studi di Napoli Federico II
lucia.mele@unina.it*

Stefania Lirer

*Università degli Studi Guglielmo Marconi
s.lirer@unimarconi.it*

Alessandro Flora

*Università degli Studi di Napoli Federico II
flora@unina.it*

Sommario

Prove triassiali cicliche non drenate sono state condotte su sabbie sature e non sature mostrando come la resistenza a liquefazione aumenti al ridurre del grado di saturazione. Partendo dallo studio dei dati sperimentali e dalle relazioni teoriche tra la deformazione volumetrica a liquefazione e il grado di saturazione iniziale è stato possibile introdurre un modello energetico di interpretazione della resistenza a liquefazione di terreni non saturi.

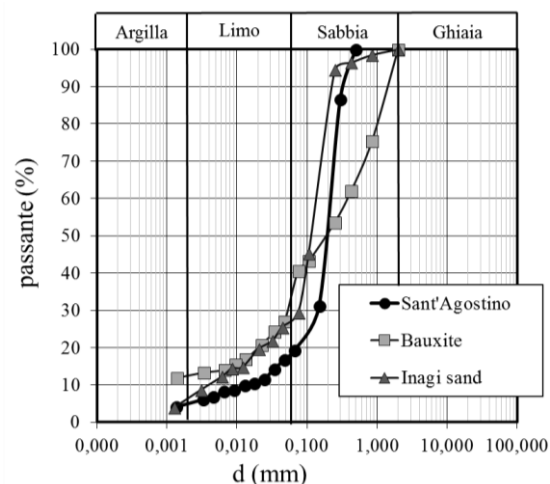
1. Introduzione

La liquefazione è un fenomeno caratterizzato da una rapida perdita di resistenza a taglio, che si verifica in terreni incoerenti (principalmente sabbie), poco addensati e in condizione di totale saturazione, soggetti a carichi rapidi come può essere un evento sismico. Tra le diverse tecniche di mitigazione contro la liquefazione la “parziale saturazione indotta” (IPS) sembra essere la più innovativa e promettente. Tale tecnica consiste nell’incrementare la resistenza a liquefazione introducendo nei pori del terreno piccole quantità di aria/gas (Eseller Bayat et al., 2012). I risultati di molti ricercatori (Chaney, 1978; Yoshimi, 1989; Yegian, 2007; Ishihara et al., 2002) hanno mostrato che la riduzione del grado di saturazione, anche se piccola, comporta un aumento della resistenza a liquefazione, ciò avviene secondo due processi (Okamura and Soga, 2006): il primo meccanismo è connesso alla bassa rigidità volumetrica dell’aria. Le bolle d’aria, infatti, “ammortizzano” le sovrappressioni neutre riducendo il loro volume. Il secondo meccanismo è dovuto invece alla suzione di matrice dei terreni non saturi che incrementa la resistenza del terreno. Questo ultimo meccanismo è rilevante solo quando il grado di saturazione è basso abbastanza da avere una fase di aria continua. In questo studio l’efficacia della parziale saturazione sulla resistenza a liquefazione è stata sperimentalmente verificata attraverso delle prove triassiali cicliche condotte su provini saturi (Università degli Studi di Napoli Federico II) e provini non saturi (Università di Tokyo). Lo studio approfondito dei risultati ha permesso di introdurre una nuova interpretazione delle prove triassiali cicliche non sature secondo un approccio energetico basato su considerazioni termodinamiche (Mele et al., 2018).

2. Materiali utilizzati e programma sperimentale

2.1 Materiali

In questa ricerca sono stati confrontati i risultati sperimentali di 3 diversi tipi di sabbie: la sabbia di Sant'Agostino (SAS), la sabbia di Inagi e la bauxite. La prima è stata prelevata da Sant'Agostino, una località italiana in provincia di Ferrara, interessata da diffusi fenomeni di liquefazione durante il terremoto dell'Emilia del Maggio 2012. Tale sabbia è stata prelevata ad una profondità di 6.8-8m dal piano campagna. Le altre due sabbie sono state studiate per confermare i risultati trovati per la sabbia di Sant'Agostino. Le proprietà dei materiali sono riportati in Tabella 1, mentre le curve granulometriche sono riportate in Figura 1. Per la bauxite a causa della difficoltà di individuare e_{max} ed e_{min} è stato utilizzato il grado di compattazione (D_c) invece della densità relativa (D_r).



Tab.1. Proprietà fisiche delle sabbie studiate.

Proprietà del materiale	SAS	Baux	Inagi
FC (<0.075 mm) (%)	20.0	40.6	29.5
G_s	2.674	2.642	2.656
D_{50} (mm)	0.200	0.200	0.115
e_{max}	1.01	-	1.645
e_{min}	0.37	-	0.907

Fig.1. Curve granulometriche delle sabbie studiate.

2.2 Programma sperimentale

Sette prove triassiali cicliche su provini di SAS in condizione di totale saturazione sono state condotte nel laboratorio di geotecnica dell'Università di Napoli Federico II nell'apparecchiatura di tipo Bishop&Wesley su provini avente un diametro di 38 mm e un'altezza di 76 mm. I provini sono preparati con la tecnica della pluviazione in acqua, per ottenere la densità relativa (D_r) desiderata ($D_r \approx 45\%$ e $D_r \approx 60\%$). I provini sono consolidati isotropicamente con una tensione di consolidazione (σ'_c) di 50 kPa e dopo sono soggetti ad una fase ciclica imponendo un *Cyclic Stress Ratio* (CSR) definite come il rapporto tra il deviatore ciclico e il doppio della tensione di consolidazione.

Prove non sature sulla sabbia di Sant'Agostino e prove sature e non sature sulla sabbia di Inagi e bauxite sono state condotte nel laboratorio di geotecnica dell'Università di Tokyo con un'apparecchiatura di tipo Linkage Double Cell System (Wang et al. 2016) dove i provini ricostituiti, con un diametro di 50 mm e un'altezza di 100 mm sono soggetti, dopo la consolidazione ad una fase deviatorica ciclica. Alla base del provino un trasduttore consente la misura della pressione di acqua nei pori (u_w), mentre in testa al provino un trasduttore di aria consente di misurare la pressione dell'aria nei pori (u_a). La tabella 2 riporta tutte le prove non sature condotte su questi terreni. Le prove sono state infine raggruppate secondo un valore medio di grado di saturazione S_r (Tab. 2).

Come noto, anche nei terreni parzialmente saturi è possibile definire le tensioni efficaci secondo la formula proposta da Bishop et al. (1963):

$$\sigma'_{un} = (\sigma - u_a) + \chi \cdot (u_a - u_w) \quad (1)$$

Dove σ è la tensione totale, mentre u_a , u_w e χ rappresentano rispettivamente la pressione di aria, di acqua e il parametro del materiale che tiene conto dell'effetto della desaturazione. Il termine $(\sigma-u_a)$ è definita tensione netta, mentre (u_a-u_w) è la suzione (s). Nel presente lavoro il parametro χ è stato posto uguale al grado di saturazione S_r (Wheeler et al., 2003; Gallipoli et al., 2003).

Tab.2. Prove triassiali cicliche non sature.

Test	σ_{un}^2 (kPa)	e^*	Dr* (%)	Sr* (%)	$S_{r\text{average}}$ (%)	CSR
U_SA1	49.5	0.710	48	53.0		0.370
U_SA2	50.5	0.670	53	54.0	55.0	0.348
U_SA3	48.9	0.670	54	56.0		0.307
U_SA4	50.5	0.610	63	90.0		0.160
U_SA5	49.8	0.600	64	81.5		0.222
U_SA6	49.8	0.590	66	87.2	87.0	0.254
U_SA7	49.9	0.580	67	86.7		0.223
U_SA8	48.8	0.590	66	87.6		0.258
U_SA9	50.4	0.610	62	88.5		0.297
U_BA1	51.9	0.910	79**	58.0		0.353
U_BA2	56.3	0.920	79**	56.0	56.7	0.361
U_BA3	51.8	0.940	78**	56.0		0.398
U_BA4	49.8	0.760	88**	84.0	84.5	0.322
U_BA5	49.1	0.750	85**	85.0		0.279
U_IN1	62.2	1.200	60	49.0		0.393
U_IN2	64.2	1.220	58	48.0	49.7	0.377
U_IN3	62.3	1.140	69	52.0		0.404

*Valori calcolati a fine consolidazione. **Valori relative al grado di compattazione

3. Risultati sperimentali

3.1 Curve di resistenza ciclica

I risultati delle prove triassiali cicliche non drenate sulla sabbia di Sant'Agostino sono riportati nel piano CRR- N_{liq} (Fig. 2).

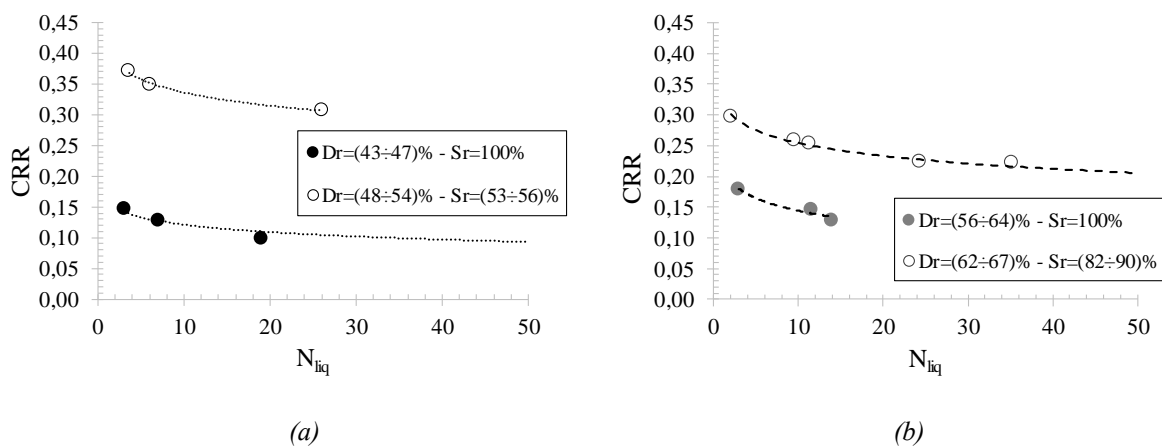


Fig. 2. Curve di resistenza ciclica della sabbia di Sant'Agostino.

In questa ricerca il criterio deformativo è stato utilizzato per valutare l'attingimento della liquefazione, ovvero il numero di cicli a liquefazione è stato valutato in corrispondenza della deformazione assiale in doppia ampiezza (ϵ_{DA}) pari al 5%.

È possibile notare come al ridurre del grado di saturazione la resistenza a liquefazione aumenti.

3.2 Deformazioni volumetriche

Il Sistema a doppia cella dell'apparecchiatura triassiale dell'Università di Tokyo consente di valutare le deformazioni volumetriche (ϵ_v) del terreno durante la fase ciclica nelle prove non sature.

Diagrammando le tensioni efficaci con le deformazioni volumetriche (in figura 3a sono riportate a titolo d'esempio le curve per la sabbia di Sant'Agostino) è possibile notare come a parità di S_r si raggiunga la stessa deformazione volumetrica finale (valutata per $\sigma'_{un}=0$), che risulta quindi indipendente dal CSR applicato. Una curva media per ogni S_r può essere valutata nel piano $\sigma'_{un} - \epsilon_v$ (Fig. 3b).

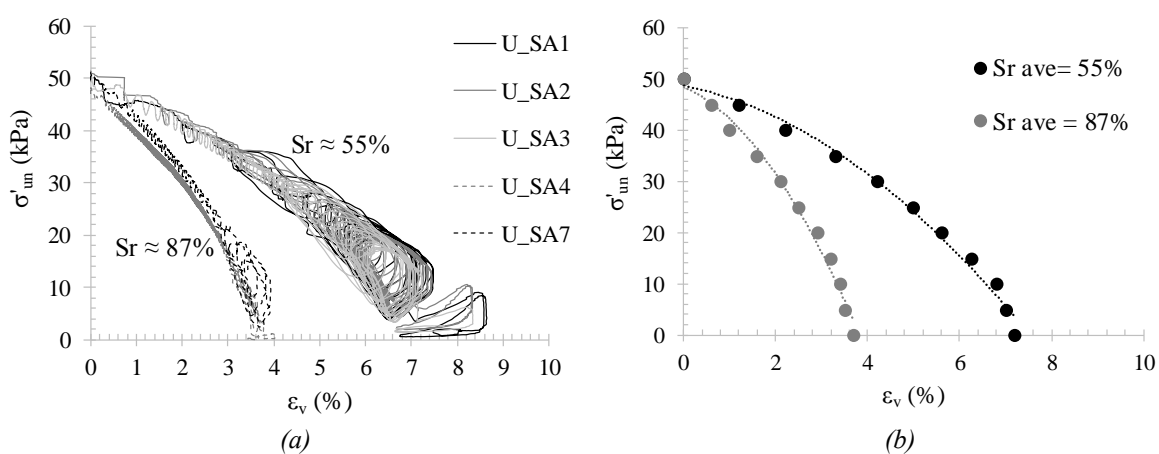


Fig. 3. Tensioni efficaci con le deformazioni volumetriche (a) e curve medie (b).

Per ogni materiale e rispetto ad ogni grado di saturazione è possibile ricavare la curva media come riportato in figura 4a. Tale curve sono state adimensionalizzate rispetto alla tensione efficace iniziale e rispetto alla deformazione volumetrica finale, ottenendo una curva unica per tutti i materiali, come si può notare in figura 4b.

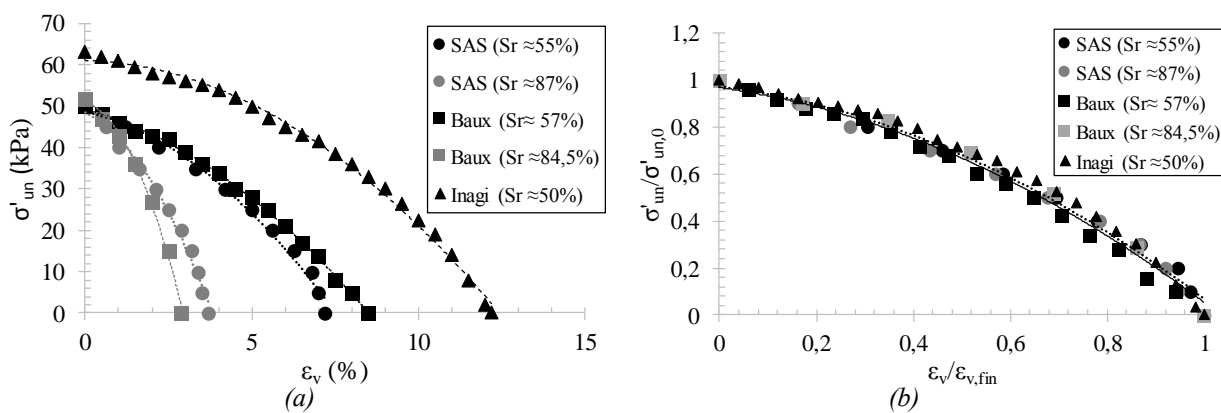


Fig.4. Curve medie di tensioni efficaci con le deformazioni volumetriche (a) e curve nel piano adimensionale (b).

4. Modello energetico

Un terreno parzialmente saturo può essere studiato come un sistema termodinamico tri-fase aperto. L'energia totale specifica di deformazione E_{tot} necessaria a raggiungere la liquefazione può essere valutata come la somma di tre componenti:

$$E_{tot,liq} = E_{sk} + E_w + E_{air} \quad (2)$$

E_{sk} rappresenta l'energia di deformazione dello scheletro solido, E_w dell'acqua e E_{air} dell'aria. Dove E_{sk} è dato dalla somma di due aliquote: la parte volumetrica ($E_{sk,v}$) e quella deviatorica ($E_{sk,s}$). La parte volumetrica è ovviamente connessa alle variazioni di volume, mentre quella deviatorica alle deformazioni distorsionali (ϵ_s). L'energia volumetrica delle diverse prove a liquefazione è stata calcolata utilizzando le seguenti formulazioni (Mele et al., 2018):

$$E_{v,sk} = \int_0^{\epsilon_{v,liq}} [(\sigma - u_a + sS_r)] \cdot d\epsilon_v \quad (3)$$

$$E_w = - \int_{S_{r,0}}^{S_{r,liq}} \frac{e(S_r)}{1 + e(S_r)} s(S_r) \cdot dS_r \quad (4)$$

$$E_{air} = \frac{e_0}{1 + e_0} (1 - S_{r,0}) u_{a,liq} d(\ln \rho_{a,liq}) \quad (5)$$

$E_{v,sk}$ non dipende dal CSR o dal N_{liq} , ma solo dalla tensione efficace (σ'_{un}), dal grado di saturazione (S_r) e dall'indice dei vuoti (e). L'integrale dell'equazione (3) può facilmente essere calcolato facendo riferimento alle curve medie mostrate in figura 4a. E_w tiene conto delle variazioni del grado di saturazione, mentre E_{air} descrive l'effetto della variazione di pressione dell'aria durante la fase ciclica. L'energia volumetrica totale a liquefazione risulta funzione del confinamento, del grado di addensamento (o indice dei vuoti) e del grado di saturazione, ovvero di tre parametri di stato del terreno. Pertanto $E_{v,liq}$ può essere considerata come un parametro sintetico dello stato del terreno e pertanto correlato alla resistenza a liquefazione del terreno. L'energia volumetrica è stata calcolata per tutte le prove e risulta unica per ogni curva di resistenza ciclica. All'aumentare dell'energia volumetrica la resistenza a liquefazione del terreno aumenta come riportato in figura 5.

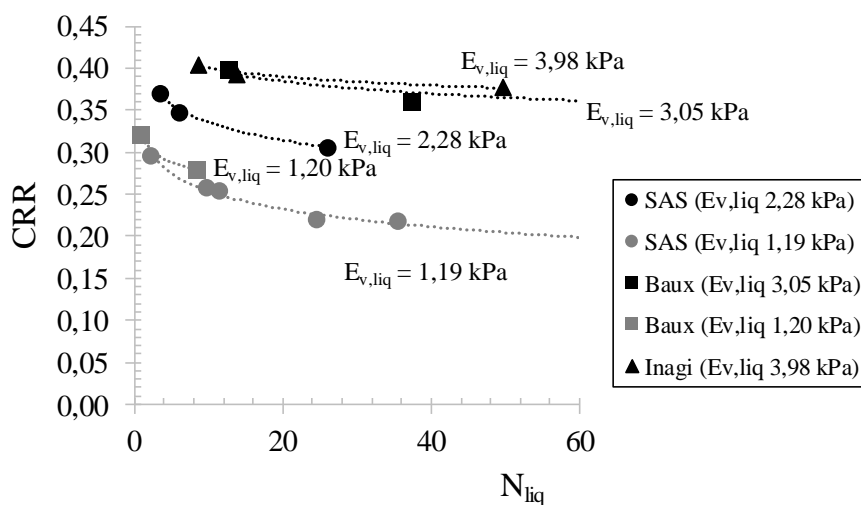


Fig.5. Curve di resistenza ciclica con i relativi valori di energia volumetrica a liquefazione.

5. Conclusioni

Le diverse prove triassiali cicliche condotte su tre tipi diversi di terreni in condizioni di completa e parziale saturazione hanno confermato come la riduzione del grado di saturazione comporti un aumento della resistenza ciclica a liquefazione. Dallo studio approfondito dei risultati sperimentali è stato possibile introdurre un nuovo parametro correlabile alla resistenza a liquefazione, ovvero l'energia specifica volumetrica a liquefazione, che può essere utilizzata come un parametro sintetico dello stato del terreno. Ulteriori prove sperimentali, risultano comunque necessarie per confermare l'efficacia dell'utilizzo di questo parametro come parametro legato alla resistenza a liquefazione.

Bibliografia

- Bishop A. W. and Blight G. E. (1963). "Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils". *Géotechnique*, 13(3): 177-197.
- Chaney R. (1978). "Saturation effects on the cyclic strength of sands". Proc., ASCE Special Conf. on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, New York, 342-358.
- Eseller-Bayat E., Yegian MK., Alshawabkeh A., Gokyer (2012). "Prevention of liquefaction during earthquakes through induced partial saturation in sands". *Geotechnical engineering: new horizons*. IOS Press, Amsterdam, 188-194.
- Gallipoli D., Gens A., Sharma R., Vaunat, J. (2003). "An elastoplastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour". *Géotechnique* 53(1): 123-135.
- Ishihara K., Tsukamoto Y., Nakazawa H., Kamada K., and Huang Y. (2002). "Resistance of partly saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities". *Soil Foundation*., 42(6): 93-105.
- Mele L., Tan Tian J., Lirer S., Flora A., Koseki J. (2018). "Liquefaction resistance of unsaturated sands: experimental evidences and theoretical interpretation". *Géotechnique (sottomesso a revisione)*.
- Okamura M. and Soga Y. (2006). "Effects of pore fluid compressibility on liquefaction resistance of partially saturated sand". *Soils and Foundations* 46: 695-700.
- Wang H., Koseki J., Sato T., Chiaro G., and Tan Tian J. (2016). "Effect of saturation on liquefaction resistance of iron ore fines and two sandy soils". *Soils and Foundations* 56(4): 732-744.
- Wheeler S. J., Sharma R. S., Bulsson M. S. R. (2003). "Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behavior in unsaturated soils". *Géotechnique* 53(1): 41-54.
- Yegian M. K., Eseller-Bayat E., Alshawabkeh A. and Ali S. (2007). "Induced-Partial Saturation for liquefaction mitigation: experimental investigation". *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering ASCE* 133(4): 372-380.
- Yoshimi Y., Yanaka K., and Tokimatsu K., (1989). "Liquefaction resistance of partially saturated sand". *Soils Found.*, 29(2): 157-162.

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.