

EVOLUZIONE DELLA GRANULOMETRIA E DELLA PERMEABILITÀ DI UNA SABBIA MONODISPERSA E BIDISPERSA SOGGETTA A COMPRESSIONE EDOMETRICA

Andrea Viglianti

*Università degli studi di Roma Tor Vergata
andreaviglianti@live.it*

Giulia Guida

*Università degli studi di Roma Tor Vergata
giulia.guida@uniroma2.it*

Francesca Casini

*Università degli studi di Roma Tor Vergata
francesca.casini@uniroma2.it*

Sommario

Il fenomeno della rottura dei grani riveste un importante ruolo nei materiali granulari, specie per alcuni terreni a grana grossa quali sabbie e ghiaie. Si verifica quando la sollecitazione imposta sulle particelle ne eccede la resistenza. Nelle opere di ingegneria civile si manifesta in zone di concentrazione degli sforzi come ad esempio nelle superfici di interfaccia palo-terreno nel caso di pali battuti in sabbia, nello scavo di gallerie profonde, nella compattazione dei rilevati stradali e nei filtri delle dighe di terra. Questo lavoro si basa su una campagna sperimentale di 34 prove di compressione monodimensionale ad alte tensioni e 9 prove edometriche con misura della permeabilità su provini di sabbia, avente una fissata granulometria mono e bidispersa. L'obiettivo è stato quello di studiare l'effetto della tensione verticale applicata e della granulometria sul fenomeno della rottura dei grani e sulla permeabilità del materiale. Sulla base dei risultati sperimentali è stato calibrato un modello di conducibilità idraulica funzione della granulometria.

1. Introduzione

Un materiale granulare sottoposto ad alte tensioni o deformazioni può presentare il fenomeno della rottura dei grani (Wang, 2011). Quando un granello si rompe, questo si divide in frammenti di dimensione minore che più facilmente si riarrangiano attorno alle particelle più grandi. La rottura dei grani genera quindi un addensamento locale del materiale, e una conseguente riduzione della permeabilità, esponendo il materiale al rischio di fenomeni legati *e.g.* alla liquefazione (Gerolymos et al., 2007).

La rottura dei grani dipende da numerosi fattori, tra i quali alcuni caratteristici dell'aggregato, come la distribuzione granulometrica iniziale, lo stato di sollecitazione e l'indice dei vuoti, e altri caratteristici delle singole particelle, come la loro dimensione, forma, resistenza e composizione mineralogica.

Tra gli effetti più facilmente misurabili indotti dalla rottura dei grani vi è l'evoluzione della curva granulometrica. All'aumentare della tensione/deformazione applicata, aumenta il grado di frantumazione delle particelle. Il sistema evolve così verso una granulometria caratterizzata da un diametro medio minore e minore uniformità. La nuova conformazione denota variazioni delle proprietà fisico- meccaniche del materiale (Bartoli *et al.*, 2015).

Il parametro di rottura relativa di Hardin (1985) B_r quantifica il fenomeno della rottura dei grani attraverso l'evoluzione della curva granulometrica. In particolare, l'incremento della frazione fine viene

descritto dal rapporto tra l'area compresa tra la curva granulometrica iniziale e quella finale e l'area confinata tra la distribuzione granulometrica iniziale e il diametro 0.074 mm. Tale rapporto assume valori compresi tra 0 e 1: l'assenza di frantumazione dei grani corrisponde ad un indice di rottura relativa pari a 0. Un indice pari ad 1 corrisponde invece alla condizione in cui tutti i grani del materiale rotto hanno dimensione pari a 0.075 mm.

2. Materiale utilizzato e programma sperimentale

Il materiale impiegato nella campagna di prove è sabbia silicea essiccata del fiume Po, tipo A e tipo 530. Le due granulometrie sono caratterizzate da differenti dimensioni dei grani. La Tipo A, ha dimensione dei grani comprese tra 0.1 mm e 1 mm. La tipo 530, ha dimensioni dei grani comprese tra 1.5 mm e 3 mm. Tale sabbia viene generalmente impiegata per opere edilizie ed è caratterizzata da un peso specifico di 2630 kg/m³. Ciascuna sabbia è stata vagliata per ottenere un materiale monogranulare, caratterizzato da dimensioni dei grani comprese tra 2 mm e 2.36 mm e tra 0.25 mm e 0.425 mm.

Il programma sperimentale ha previsto una campagna di prove di compressione monodimensionale ad alte tensioni con valori di 54 MPa e 100 MPa, necessarie per indurre la rottura dei grani, e prove edometriche con misura della conducibilità idraulica su provini di sabbia con diversa composizione granulometrica iniziale. Le prove di compressione monodimensionale ad alte tensioni sono state eseguite mediante l'utilizzo della INSTRON 4482. Sono prove a velocità di spostamento controllata pari a 1 mm/min. La misura della conducibilità idraulica è stata resa possibile mediante una modifica dell'anello di contenimento della cella edometrica. Tale modifica è consistita nella progettazione e successiva realizzazione, mediante l'utilizzo della stampante 3D Ultimaker S5, di un supporto che consente di mantenere costante il livello dell'acqua nell'anello edometrico.

Le prove sono state effettuate su 3 diverse granulometrie (Figura 2.a):

- monodispersa da 2 mm;
- monodispersa da 0.25 mm;
- bidispersa, costituita dal 60 % in volume di particelle con diametro caratteristico di 2 mm e dal 40 % in volume di particelle con diametro caratteristico di 0.25 mm. (in Figura 2.a definita GAP dall'inglese *gap graded*).

3. Interpretazione dei risultati

Figura 1 riporta i risultati delle prove monodimensionali ad alte tensioni in termini di evoluzione dell'indice dei vuoti e con la tensione verticale applicata σ_v , in scala logaritmica, eseguite sulle 3 granulometrie sopradescritte.

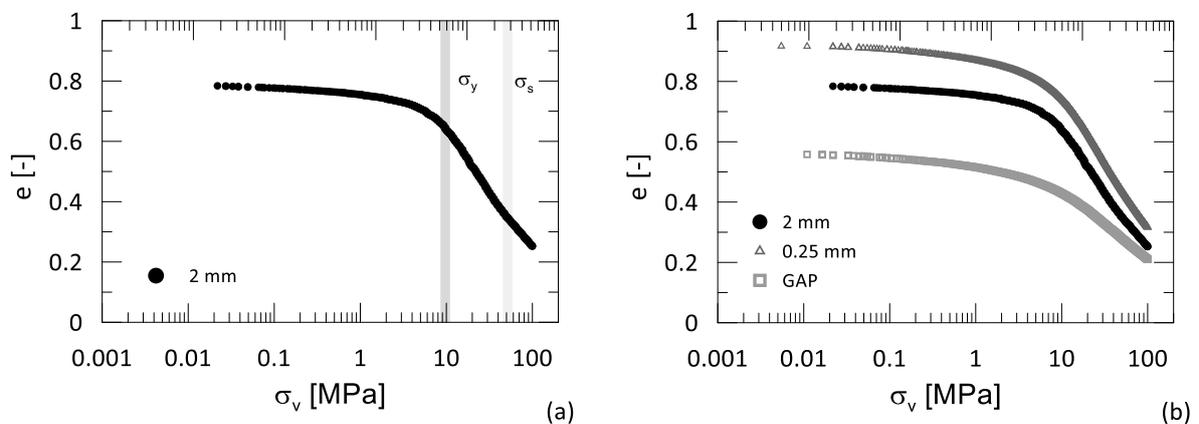


Fig 1. Curve di compressibilità a tensione verticale applicata 100 MPa.

La curva di compressibilità del materiale può essere suddivisa in tre tratti (Guida *et al.*, 2018), confinati dalla tensione di snervamento σ_y e dalla tensione di inflessione σ_s , (Figura 1a). Il primo tratto sub-orizzontale della curva, sino a σ_y , descrive deformazioni irreversibili dovute al solo riarrangiamento dei grani. Il tratto della curva compreso tra σ_y e σ_s descrive il completo sviluppo del fenomeno della rottura dei grani. L'elevata pendenza della curva denota l'influenza del fenomeno sulla compressibilità del materiale. Oltre σ_s , la pendenza della curva si riduce: il fenomeno della rottura dei grani si arresta. In Figura 2 sono riportate (a) le 3 granulometrie adottate e (b) la loro evoluzione a differenti stati tensionali applicati (54MPa e 100MPa). Le granulometrie monodisperse subiscono una maggiore rottura dei grani rispetto alla granulometria bidispersa, perché la frazione fine si inserisce nei vuoti della frazione grossa confinandola e incrementandone la resistenza a rottura.

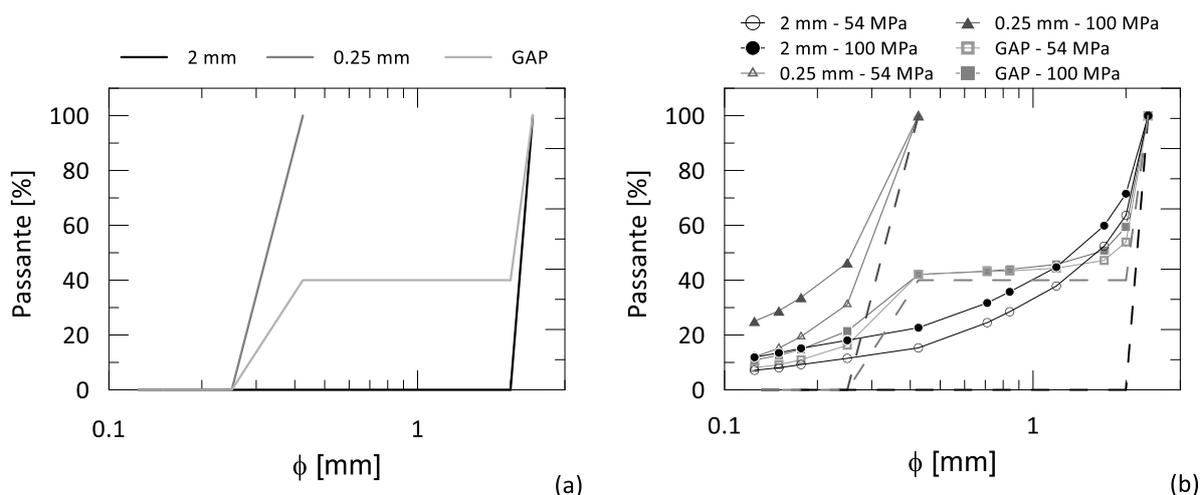


Fig 2. (a) Curve granulometriche integre, (b) post-rottura.

Figura 2.b mostra come all'aumentare della tensione verticale applicata la curva si distacca da quella iniziale: si sposta verso sinistra e verso l'alto, ruotando attorno al punto di massimo diametro. Maggiore è il distacco dalla condizione iniziale, maggiore è il fenomeno della rottura dei grani.

In Figura 3 si riporta il parametro di rottura relativa di Hardin per le diverse granulometrie soggette alle due tensioni massime di 54 MPa e di 100 MPa. Br tende a aumentare proporzionalmente alla tensione verticale applicata e è maggiore per le granulometrie monodisperse e in particolare per quella caratterizzata da una frazione granulometrica maggiore.

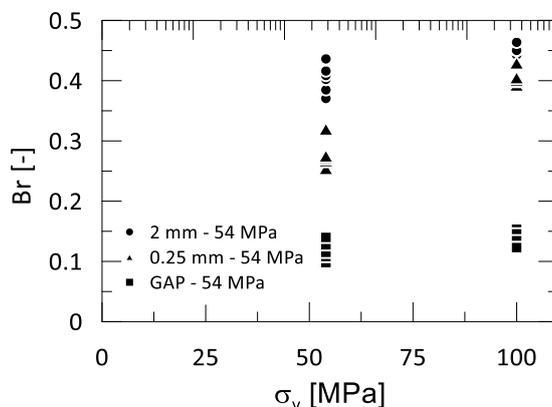


Fig 3. Andamento del parametro di rottura relativa di Hardin.

Figura 3 riporta i risultati della prova edometrica in termini di: evoluzione di (a) indice dei vuoti e (b) permeabilità con la tensione verticale applicata. In questa prova, condotta a tensioni controllate, la tensione massima a cui si sottopone il provino è di 3.2 MPa. A tali livelli tensionali non si ha il fenomeno

della rottura dei grani per la sabbia in esame, quindi la variazione di volume è imputabile prevalentemente al fenomeno del riarrangiamento dei grani (Figura 4a). Ad ogni step di carico o scarico, è stata misurata la conducibilità idraulica. Questa diminuisce al diminuire dell'indice dei vuoti, riproducendo l'andamento della curva di compressibilità (Figura 4b). La prova edometrica con la misura della conducibilità idraulica è stata ripetuta sul materiale post prova della compressione monodimensionale a 100MPa (materiale fratturato), caratterizzato da una granulometria più assortita di quella del materiale integro. Figura 4 riporta un confronto tra i risultati ottenuti sul materiale fratturato e quello sul materiale integro in termini di evoluzione (a) dell'indice dei vuoti e (b) della permeabilità con la tensione verticale applicata. Si osserva come il materiale fratturato risulti più compressibile rispetto al materiale integro (Figura 4a). La maggior compressibilità si traduce anche in una minore conducibilità idraulica, come si osserva dalla Figura 4b.

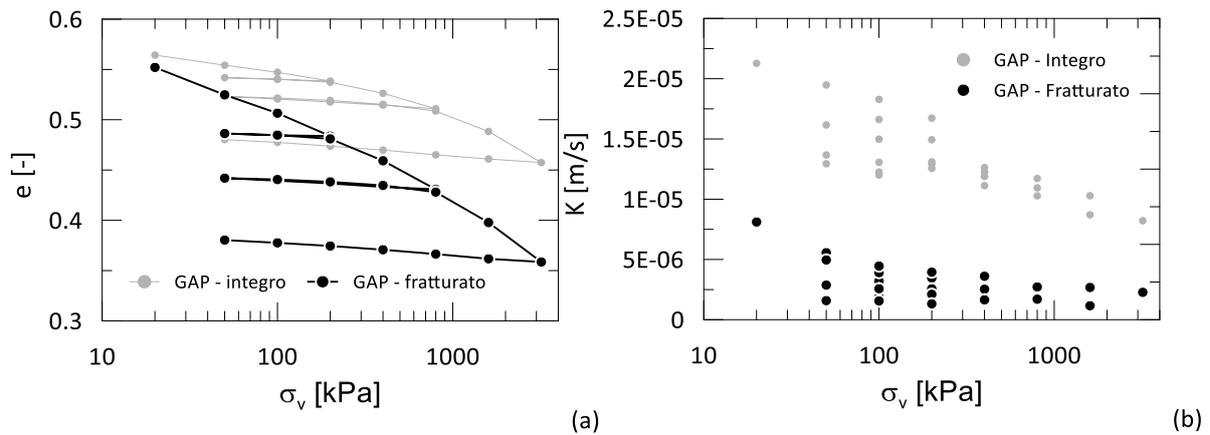


Fig 4. Confronti: (a) Prova edometrica, GAP integro-fratturato e (b) Prova di permeabilità, GAP integro-fratturato.

4. Modello previsionale

Tra i diversi modelli di conducibilità idraulica di un materiale, il modello proposto da El-Husseiny (2021) utilizza la seguente espressione:

$$K = \left(\frac{\rho_{fl} g}{\mu} \right) \left(\frac{d_{rep}^2 n^3}{180(1-n)^2} \right) \quad (4.1)$$

dove: ρ_{fl} è la densità del fluido, g è l'accelerazione di gravità, μ è la viscosità dinamica del fluido, d_{rep} è la dimensione caratteristica dei grani e n è la porosità.

Sulla base di questa formulazione, introducendo ulteriori parametri, è stato possibile calibrare un nuovo modello che interpretasse i dati sperimentali ottenuti in questo lavoro. La relazione proposta è la seguente:

$$K = \frac{\rho_{fl} g}{\mu} \left(\frac{d_{50}}{d_{max}} \right)^2 \frac{n^3}{C(1-n)^2} \left(\frac{\alpha}{1-B_r} \right)^4 \quad (4.2)$$

dove:

- d_{50} è il diametro che corrisponde al 50% del passante;
- d_{max} è il diametro massimo all'interno della composizione granulometrica;
- C è il coefficiente di curvatura;
- B_r è il parametro di rottura relativa di Hardin;
- $\alpha = 0.00194$ ($1/m^{0.5}$) è un parametro empirico.

Nella Figura 5 si riporta un confronto tra le misure sperimentali e le previsioni del modello.

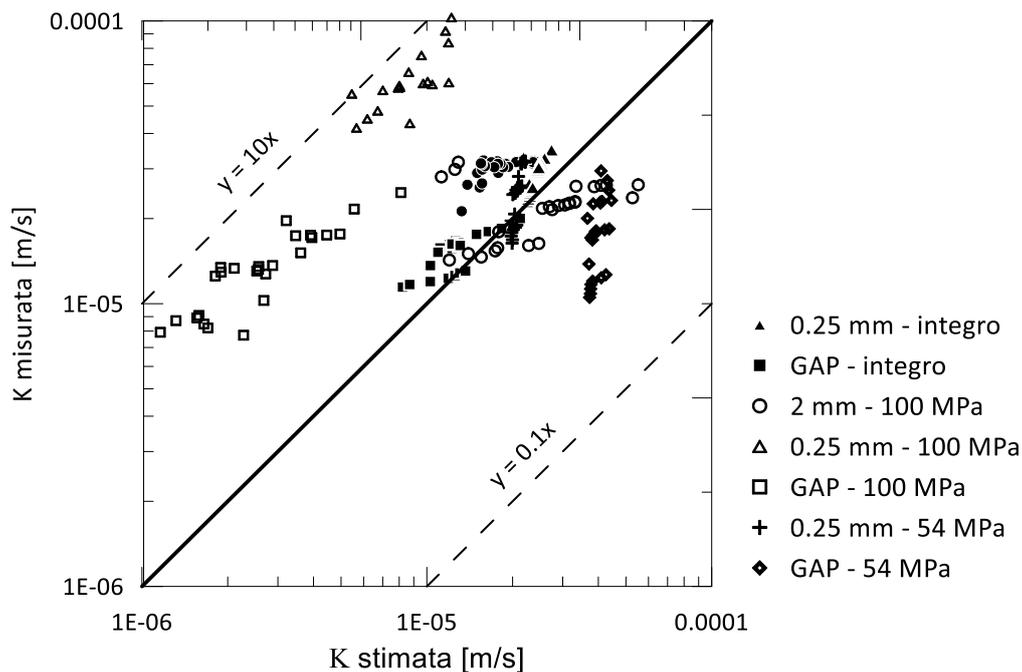


Fig 5. Confronto tra le misure sperimentali di conducibilità e le previsioni del modello proposto.

Si osserva come il modello riproduce bene i valori di K per le granulometrie integre: al diminuire del diametro caratteristico, diminuisce anche la conducibilità idraulica. Inoltre, al diminuire della porosità (e.g. granulometria bi-dispersa), diminuisce K . Una configurazione più densa, che caratterizza la granulometria bidispersa, in parte inibisce la filtrazione del fluido interstiziale. Si osserva però come alcune previsioni del modello non sono soddisfacenti per alcune granulometrie. Per questo motivo, il modello è ancora in fase di studio.

5. Conclusioni

L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di investigare l'evoluzione delle proprietà fisiche e meccaniche del materiale, sottoposto a alte tensioni verticali per generare il fenomeno. Una particolare attenzione è stata rivolta alla variazione della conducibilità idraulica. Dalle prove di compressione monodimensionale ad alte tensioni, si è osservato come le curve di compressibilità descrivono un comportamento differente delle due composizioni granulometriche. Le monodisperse si mostrano meno resistenti al fenomeno rispetto alla bidispersa. Le particelle di maggior dimensioni sono circondate da particelle di piccolo diametro, esercitano un effetto di confinamento che caratterizza una maggiore resistenza alla rottura. L'evoluzione della granulometria si traduce in un'evoluzione delle proprietà meccaniche del materiale. In particolare si è osservata la variazione della conducibilità idraulica. Le prove di permeabilità mostrano come l'andamento della conducibilità idraulica diminuisce al diminuire dell'indice dei vuoti e della dimensione dei grani. La produzione di fine, dovuta alla rottura dei grani post-prova monodimensionale ad alte tensioni, riduce la conducibilità idraulica. Il materiale assume una configurazione più densa che in parte inibisce la filtrazione dell'acqua. Infine, i dati sperimentali ottenuti della conducibilità idraulica sono stati confrontati con il modello previsionale di El-Husseiny (2021). Dalla proposta dell'autore, è stata calibrata una formulazione che ben approssima la maggior parte dei valori sperimentali ottenuti.

Bibliografia

- Bartoli, M., Casini, F., Viggiani, G. M. (2015), 'Sull'evoluzione della distribuzione granulometrica di un materiale a grani frantumabili a sollecitazioni elevate', Università di Roma Tor Vergata. Fredlund D.G., Rahardjo H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Wiley and Sons Inc., New York.
- Casini, F., Viggiani, G. M., Springman, S.M. (2013), 'Breakage of an artificial crushable material under loading', *Granular matter* 15(5), 661 – 673.
- El – Hussein, A. (2021), 'Unified Packing Model for Improved Prediction of Porosity and Hydraulic Conductivity of Binary Mixed Soils', *Water*, 13, 455.
- Gerolymos, N., Gazetas G., (2007), 'A model for grain-crushing-induced landslides -Application to Nikawa, Kobe 1995', National Technical University, Athens, Greece.
- Guida, G., Casini, F., Viggiani, G. M., Ando, E., & Viggiani, G. (2018). Breakage mechanisms of highly porous particles in 1D compression revealed by X-ray tomography. *Géotechnique Letters*, 8(2), 155-160.
- Hardin, B. O. (1985), 'Crushing of soil particles', *Journal of geotechnical engineering* 111(10), 1177-1192.
- Wang, Z., Wong, R.C.K., Qiao, L. (2011), 'Investigation on relations between grain crushing amount and void ratio change of granular materials in one-dimensional compression and creep tests', *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* Volume 3, Supplement 1, Pages 415-420.