

CONDUCIBILITÀ IDRAULICA DELLE TERRE A GRANA MEDIO-FINE, INDAGINE SPERIMENTALE

Alex Sanzeni, Francesco Colleselli, Davide Grazioli
Università di Brescia, DICATA
alex.sanzeni@unibs.it

Sommario

La conducibilità idraulica delle terre può essere valutata con la formula di Kozeny-Carman (1927, 1938); viene proposto un procedimento per determinare la superficie specifica di terre costituite da miscele di argilla, limo e sabbia, ottenuto combinando il contributo della frazione incoerente con quello della frazione argillosa. L'applicabilità della formula di Kozeny-Carman è stata verificata mediante il confronto con i risultati di circa 70 prove di permeabilità condotte prevalentemente in cella triassiale. Il procedimento sviluppato per la stima della superficie specifica e la formula di Kozeny-Carman hanno fornito una buona stima della conducibilità idraulica verticale nell'intervallo tra 1×10^{-11} e 5×10^{-6} m/s.

La formula di Kozeny e Carman

Nel 1927 J. Kozeny ha proposto una formula di natura semiempirica che può essere utilizzata per la stima della conducibilità idraulica di un mezzo poroso saturo. La relazione di Kozeny è stata successivamente modificata da Carman (1938) ed è oggi nota come equazione di Kozeny-Carman (nel seguito abbreviata in "K-C"):

$$k = (\gamma / \mu) (1 / C_{K-C}) (1 / S_0^2) \left[e^3 / (1 + e) \right] \quad (1)$$

Nella (1) γ e μ sono il peso di volume e la viscosità del fluido, C_{K-C} è un coefficiente empirico generalmente assunto pari a 5, S_0 è la superficie specifica dei grani per unità di volume (1/m), e è l'indice dei vuoti. Se il permeante è acqua a 20°C, il rapporto γ / μ è pari a $9,93 \times 10^4$ 1/cms, pertanto l'equazione (1) diventa:

$$k = 1,99 \times 10^4 (1 / S_0^2) \left[e^3 / (1 + e) \right] \quad (2)$$

La (1) consente di stimare la conducibilità idraulica di un mezzo poroso saturo quando sono note le caratteristiche del fluido (peso di volume e viscosità), la superficie specifica dei grani ed il grado di addensamento del mezzo. La formula di K-C può essere utilizzata in un ampio intervallo di conducibilità, ma sino ad ora non ha conosciuto una diffusione significativa nella pratica ingegneristica. Il principale limite all'uso dell'equazione risiede nella difficoltà della determinazione della superficie specifica dei grani: essa può essere misurata direttamente oppure stimata, ma il campo di variabilità è molto ampio ed il suo valore dipende dalle dimensioni e dal tipo di legame tra le particelle che costituiscono il terreno. Nel presente studio si è tentato di superare tale limite sviluppando un procedimento per determinare la superficie specifica dei grani, combinando il contributo della frazione incoerente (non plastica) con quello della frazione argillosa. Il metodo è adatto per determinare la superficie specifica di terreni costituiti da miscele di argilla, limo e sabbia (permeabilità inferiore a $10^{-5} \div 10^{-6}$ m/s). L'indagine sperimentale sulla validità del procedimento e della formula di K-C è stata condotta confrontando le stime di conducibilità idraulica fornite dalla K-C con i risultati di circa 70 prove di permeabilità, eseguite utilizzando l'apparato della cella triassiale.

Metodi per la determinazione della superficie specifica

Attualmente non esiste una specifica ASTM per la misura della superficie specifica S dei terreni (Carrier, 2003). Nell'industria del cemento lo standard ASTM C 204-07 consente di stabilire la finezza di macinazione del cemento mediante una prova di permeabilità all'aria il cui risultato può essere interpretato per ottenere la superficie specifica del legante. Tale prova, simile al metodo proposto da Lea e Nurse (1939) e descritto nella norma BS 12:1958, consente di stimare la superficie specifica utilizzando la relazione di Carman e rappresenta, pertanto, una misura indiretta della superficie specifica. La misura assoluta dell'area superficiale può essere ottenuta con il classico metodo "BET", basato sull'omonima teoria dell'assorbimento di un mono-strato di molecole sulla superficie delle particelle di un solido (Brunauer, Emmett e Teller; 1938).

In alternativa alla misura diretta della superficie specifica S , in letteratura sono disponibili alcuni metodi per la stima di tale parametro a partire dai valori di alcune proprietà indice assai più comuni nel campo della pratica dei laboratori di terre. Il metodo più diffuso per la stima della superficie specifica di terreni sabbiosi si basa sui dati relativi alla granulometria del materiale (Fair e Hatch, 1933; Chapuis e Legaré, 1992; Chapuis e Aubertin, 2003; Carrier, 2003) e sfrutta le seguenti equazioni:

$$S_0 = (\pi D_{eff}^2) / \left[(\pi D_{eff}^3 / 6) \right] = SF / D_{eff} \quad (3a)$$

$$D_{eff} = 100\% / \left[\sum (f_i / D_{ave,i}) \right] \quad (3b)$$

$$D_{ave,i} = D_{l,i}^{0,5} \times D_{s,i}^{0,5} \quad (3c)$$

dove S_0 è la superficie specifica dei grani per unità di volume, D_{eff} è il diametro rappresentativo di un dato intervallo granulometrico, f_i è la frazione di particelle compresa tra 2 setacci di vagliatura con diametro $D_{l,i}$ e $D_{s,i}$, e $D_{ave,i}$ rappresenta il diametro medio tra due setacci. SF è un coefficiente di forma dei grani ($SF = 6 \div 8,4$ per particelle di forma sferica o angolata). Per terreni argillosi è possibile utilizzare la relazione tra superficie specifica S e limite liquido investigata in alcuni studi teorici e sperimentali tra i quali si cita quello di Muhunthan (1991), il quale ha esaminato i dati sperimentali riportati in varie pubblicazioni e ha proposto la seguente correlazione (Figura 1):

$$1/w_L = \lambda(1/S) + \beta \quad (4)$$

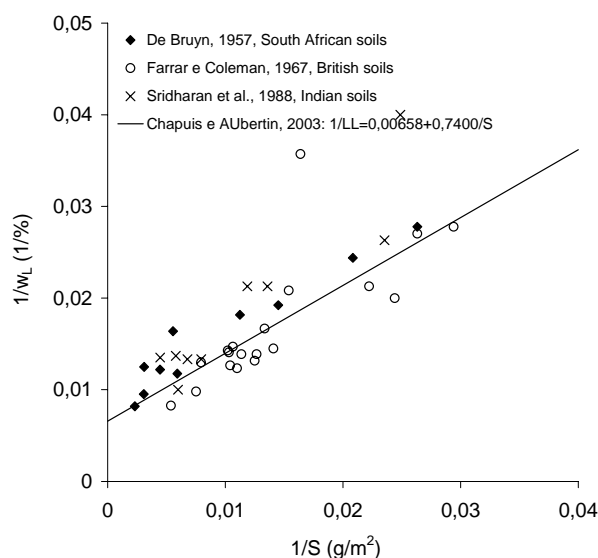


Figura 1. Correlazione empirica tra limite liquido e superficie specific (da Muhunthan, 1991)

Procedimento proposto per la stima della superficie specifica

Il procedimento per la stima della superficie specifica proposto nel presente studio trae origine dalla constatazione che il terreno (miscela di sabbia, limo e argilla) è in genere costituito da una frazione grossolana incoerente (non plastica) e da una coesiva. Per quanto riguarda la frazione incoerente, la stima della superficie specifica può essere condotta mediante il metodo di Carrier (equazione 3), considerando il contributo dei grani fino a dimensioni superiori a 0,002 mm. Per la frazione argillosa, la superficie specifica può essere stimata mediante la correlazione empirica con il limite liquido (equazione 4). La superficie specifica complessiva del terreno è ottenuta come media pesata dei valori stimati per la frazione incoerente e per quella argillosa:

$$S_0 = (S_{0,d>2\mu m} \cdot f_{d>2\mu m} + S_{0,d<2\mu m} \cdot f_{d<2\mu m}) / (100\%) \quad (5)$$

dove $S_{0,d>2\mu m}$ è il valore della superficie specifica della frazione incoerente, $S_{0,d<2\mu m}$ il valore della superficie specifica della frazione argillosa, $f_{d>2\mu m}$ e $f_{d<2\mu m}$ le relative frazioni granulometriche espresse come percentuale del peso del provino. Implicitamente il metodo ipotizza che il peso specifico dei grani sia costante e che il comportamento plastico dei terreni coesivi dipenda esclusivamente dalle particelle con dimensioni inferiori a 0,002 mm, come osservato da Casagrande (1932) e da Lambe e Whitman (1979).

Indagine sperimentale

Il metodo proposto per la stima della superficie specifica e la formula di Kozeny-Carman sono stati sottoposti ad un processo di validazione basato sul confronto con i risultati di 70 prove di conducibilità condotte presso il laboratorio di geotecnica della ditta Vicenzetto Srl (Villa Estense, Padova) tra gli anni 2006 e 2010. I campioni provengono dal fondo e dalle pareti di discariche, da rilevati stradali, da cave di argilla della provincia di Verona e da campagne di indagini geotecniche in alcuni siti italiani ed esteri come Ponte di Legno (BS), la Laguna di Venezia (VE), Ancona (AN), Durazzo (Albania). I campioni esaminati (Fig. 2), sono classificati prevalentemente come argille di medio-bassa plasticità (CL-CH), limi argillosi di bassa plasticità (ML), sabbie argillose (SC) e sabbie limose (SM), con limite liquido nell'intervallo 17÷70%, limite plastico 15÷34%, indice di plasticità 5÷45%, coefficiente di attività A generalmente compreso tra 0,75 e 1,25.

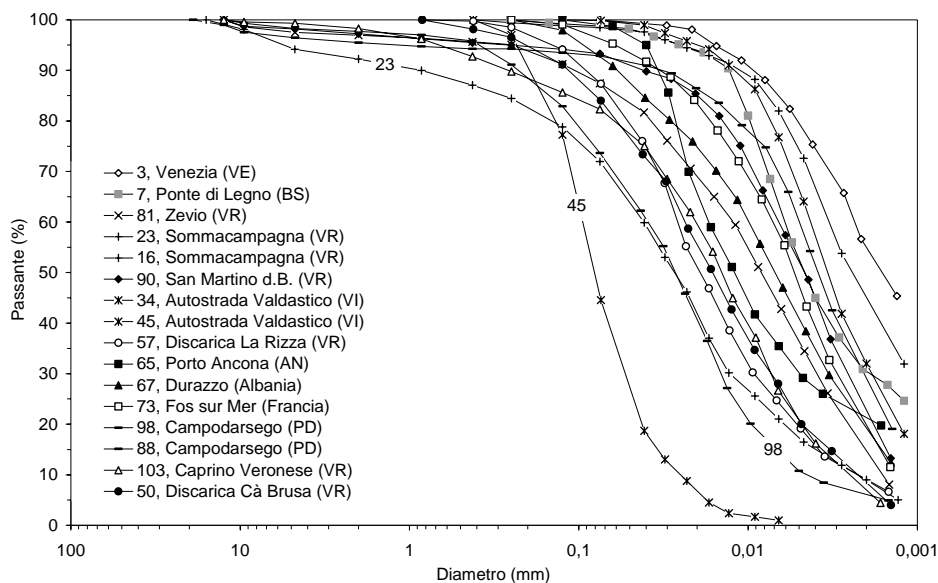


Figura 2. Curve granulometriche di campioni esaminati

Il trattenuto al setaccio ASTM n. 200 è generalmente compreso tra 0% e 60% ed è costituito principalmente da sabbia fine e media. Per circa 55 dei 70 campioni esaminati sono disponibili le informazioni necessarie per la stima della superficie specifica S e per l'utilizzo della K-C (riportate nella Tabella in Appendice): curva granulometrica completa ottenuta per vagliatura e sedimentazione (ASTM D 422); indice dei vuoti; limiti di Atterberg (ASTM D 4318). Per quanto riguarda la misure sperimentali la maggior parte dei dati è stata ottenuta da prove di permeabilità verticale eseguite in cella triassiale, secondo la norma ASTM D 5084-00 (Metodo A).

Nella Figura 3 è illustrato il confronto tra misura e stima della conducibilità idraulica per 25 campioni tra quelli complessivamente disponibili. La stima della conducibilità è stata condotta utilizzando la formula di K-C (eq. 2) nella quale sono stati introdotti i valori della superficie specifica S calcolati nei seguenti modi: i) utilizzando il metodo analitico sviluppato per terreni incoerenti (equazione 3); ii) mediante la correlazione tra S e w_L (equazione 4); iii) combinando i risultati dei due metodi secondo l'equazione (5). Per i campioni di terreno esaminati, con permeabilità $5 \times 10^{-10} < k < 5 \times 10^{-8}$ m/s, la formula K-C sovrastima di circa due ordini di grandezza la conducibilità reale del terreno, se il valore della superficie specifica è determinato utilizzando esclusivamente i dati della curva granulometrica (eq. 3). Viceversa, se la superficie specifica è stimata utilizzando la correlazione con il limite liquido e trascurando il contributo della frazione incoerente (eq. 4), la K-C porta a una sottostima della conducibilità k di oltre due ordini. La conducibilità idraulica verticale stimata utilizzando i valori di S determinati secondo il procedimento di calcolo proposto (eq. 5), è compresa tra 1/3 e 3 volte il valore della permeabilità misurata e pertanto in migliore accordo con i risultati delle prove di laboratorio.

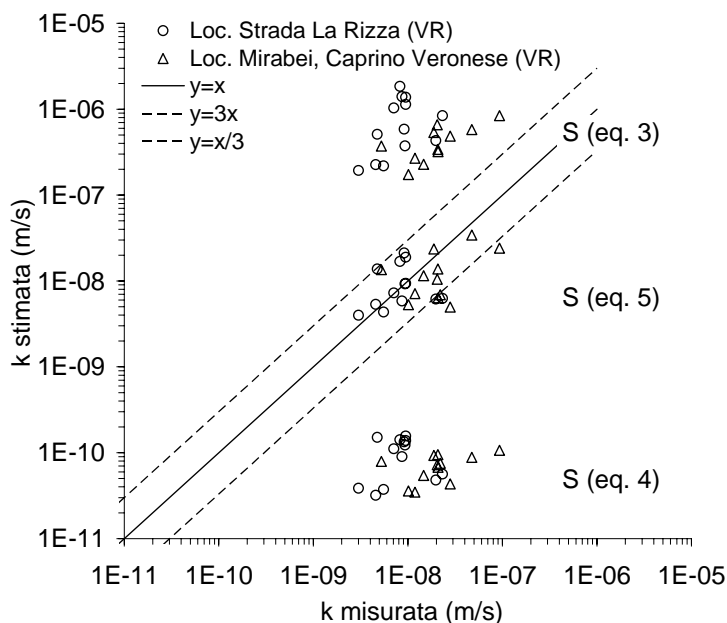


Figura 3. Confronto tra misura e stima della conducibilità mediante l'equazione di K-C

In analogia con quanto descritto precedentemente, il procedimento proposto per la stima della superficie specifica è stato applicato a tutti i dati sperimentali disponibili. I risultati dell'elaborazione, inclusi quelli riportati nella Fig. 3, sono illustrati nel grafico di Fig. 4 che mostra il confronto tra conducibilità misurata in laboratorio e conducibilità stimata con la formula di Kozeny e Carman (equazioni 2 e 5).

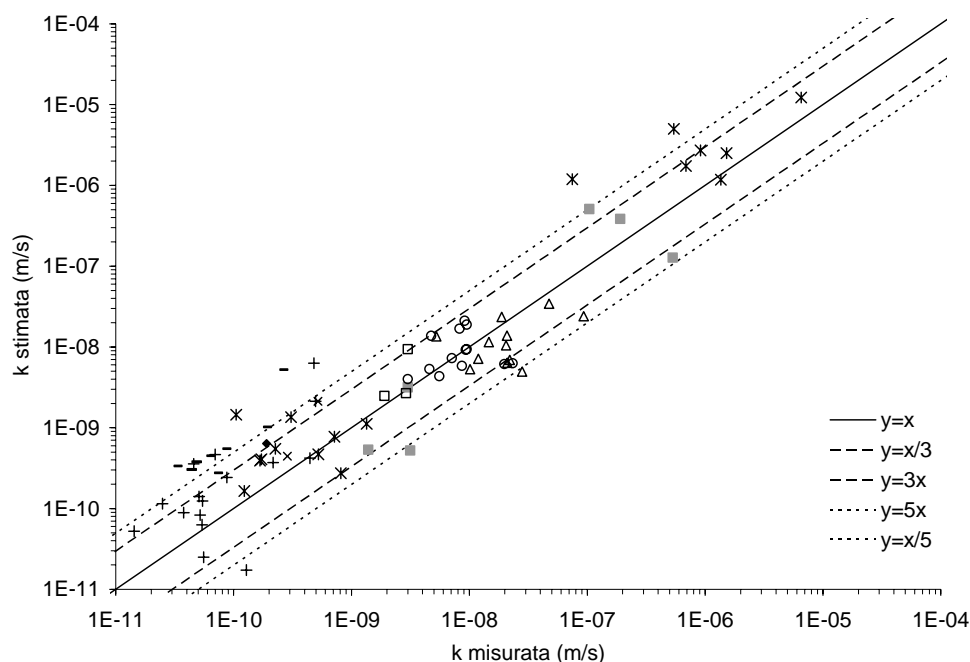


Figura 4. Confronto tra misura e stima della conducibilità idraulica mediante la formula di K-C (equazioni 2 e 5)

Il confronto tra i dati dimostra che la K-C può essere utilizzata per una stima soddisfacente della conducibilità idraulica verticale di terreni saturi costituiti da miscele di argilla, limo e sabbia. Nell'intervallo di conducibilità compreso tra 1×10^{-11} e 5×10^{-6} m/s, la formula K-C ha consentito di stimare valori di k compresi tra 1/5 e 5 volte il valore di conducibilità misurata in laboratorio, sebbene un numero elevato di dati sia compreso nell'intervallo tra 1/3 e 3 volte il valore della conducibilità misurata. Per circa il 15% dei campioni esaminati in questo intervallo, la conducibilità stimata è fino a un ordine di grandezza maggiore di quella misurata; ciò può dipendere dal risultato della prova per la determinazione del limite liquido w_L e dall'accuratezza della correlazione empirica tra S e w_L . Le differenze tra misura e stima di k appaiono meno evidenti per i campioni con permeabilità misurata compresa tra 5×10^{-10} e 5×10^{-9} m/s e con limite liquido nell'intervallo 25÷50%. Un altro aspetto che riveste un ruolo importante nella stima della superficie specifica (e ha effetto sulla stima della conducibilità), è il contenuto di fine e, in particolare, il contenuto di argilla, ottenuto dall'elaborazione dei dati della prova di sedimentazione.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare la ditta Vicenzetto S.r.l. di Villa Estense (PD) per aver messo a disposizione gran parte dei dati sperimentali presentati e, in particolare, il P.i. Agostino Merlin per la preziosa collaborazione.

Bibliografia

- Carman, P. C. (1938). Determination of the specific surface of powders. *Journal of the Society of Chemical Industry*. Trans., vol. 57, pp. 225.
- Carrier, W. D. (2003). Goodbye, Hazen; hello, Kozeny-Carman. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, vol. 129(11), pp. 1054-1058.
- Chapuis, R. P. and Aubertin M. (2003). Evaluation of the Kozeny-Carman's equation to predict the hydraulic conductivity of a soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3), pp. 616-

628.

Grazioli, D. (2008). Stima della permeabilità e validazione di leggi semi-empiriche. Tesi di Laurea. Università degli Studi di Brescia.

Kozeny, J. (1927). Ueber kapillare leitung des wassers im boden. *Sitzungsberichte Wiener Akademie*, 136 (2a), pp. 271-306.

Muhunthan, B. (1991). Liquid limit and surface area of clays. *Géotechnique*, 41(1), pp. 135-138.