



MODELLAZIONE FISICA DEL FENOMENO DI EROSIONE INTERNA

Marco Caruso

Laboratorio Prove Materiali Strutture e Costruzioni, Politecnico di Milano
marco.caruso@polimi.it

Cristina Jommi

Department of Geoscience and Engineering, Delft University of Technology
c.jommi@tudelft.nl

Donatella Sterpi

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano
donatella.sterpi@polimi.it

Sommario

Fra le cause di collasso di pendii e rilevati in terra soggetti a filtrazione vi è l'erosione interna di particelle, fenomeno evolutivo che può manifestarsi inizialmente in modo diffuso, per poi localizzarsi in canali di flusso, oppure innescarsi lungo discontinuità preesistenti. Questo contributo presenta lo sviluppo di un'attrezzatura di laboratorio per l'osservazione e la misura del fenomeno di erosione interna e formazione di canali di flusso alla piccola e media scala. Consente di analizzare l'influenza del percorso di flusso e di una pressione di confinamento, di condurre prove in regime di filtrazione confinata o non confinata, e di ricostruire modelli fisici in scala ridotta di pendii e rilevati, per strati di qualunque inclinazione.

1. Introduzione

Nel processo di filtrazione di un fluido in un mezzo poroso granulare, l'interazione fra fluido e parti solide comporta pressioni e forze di trascinamento che inducono variazioni nella struttura del materiale, in termini di deformazioni e possibile erosione di parti solide.

L'erosione interna consiste nelle due fasi di distacco della particella dalla struttura e trasporto lungo un canale di flusso, finché la particella non si porta all'esterno del corpo poroso o si rideposita in un restringimento lungo il canale. Il fenomeno può essere diffuso sul volume (in questo caso è definito con il termine *suffusion*) e comportare un aumento di porosità del mezzo. Sono più sensibili a questo fenomeno le terre caratterizzate da una struttura primaria di particelle di grosse dimensioni e una struttura secondaria di particelle molto più fini, che possono essere trasportate facilmente all'interno della macroporosità della struttura primaria. Per questo motivo, alcuni criteri di verifica della cosiddetta stabilità interna di una terra si basano sulla sua analisi granulometrica (Kenney e Lau, 1985; Indraratna e Radampola, 2002; Moffat e Fannin, 2011).

L'erosione interna può essere anche di natura localizzata, sia per l'evoluzione di un fenomeno inizialmente diffuso che tende a raccogliersi lungo canali di flusso, sia per innescamento e concentrazione lungo discontinuità naturali, che possono essere fratture preesistenti o un'interfaccia suolo-struttura (Richards e Reddy, 2012). Una volta che il canale di flusso è abbastanza largo da non poter più essere occluso dalle particelle in movimento (fenomeno di *piping*), l'erosione può essere vista come sola fase di distacco delle particelle e analizzata quindi come fenomeno di erosione superficiale.

L'erosione comporta quindi una variazione di porosità o la formazione di cavità o tubi di flusso e, in

generale, una variazione delle proprietà meccaniche e idrauliche del mezzo poroso (Sterpi, 2003; Ke e Takahashi, 2012; Xiao e Shwiyhat, 2012). Poiché queste ultime sono a loro volta responsabili di variazioni del regime di flusso, ne consegue che il processo ha un carattere evolutivo nel tempo e può portare a fenomeni di collasso locale o globale.

La ricerca sperimentale sul fenomeno di erosione è tradizionalmente legata al progetto di filtri per opere in terra quali argini e dighe (Fischer e Holtz, 1996), ma il potenziale di erodibilità interna riguarda anche l'analisi di stabilità di pendii naturali omogenei o fratturati (Fox e Wilson, 2010).

2. Osservazione sperimentale dell'erosione interna

I meccanismi di erosione interna sono stati osservati sperimentalmente mediante vari tipi di attrezzature di laboratorio progettati allo scopo. Il principio comune ad essi è l'applicazione di un flusso idraulico attraverso un campione, mediante il controllo del carico idraulico di valle e di monte, e la misura della quantità di particelle fini erose e trasportate in un serbatoio di valle.

Esistono due tipologie principali di prova: la prima studia l'evoluzione dell'erosione in un canale di flusso e consiste nell'innescare il fenomeno creando preliminarmente all'interno del campione un foro passante. La prova non richiede campioni di grandi dimensioni, eventualmente solo che il percorso di flusso sia lungo, in modo che l'allargamento del foro in un vero canale di flusso sia significativo. In questo caso l'erosione è di natura superficiale e può essere interpretata sulla base di un equilibrio fra le forze di trascinamento esercitate dal flusso d'acqua e la resistenza coesivo-frizionale al distacco della particella (Wan e Fell, 2004; Haghghi et al., 2013).

La seconda tipologia di prova studia il potenziale di erodibilità interna, ovvero le condizioni perché si verifichi un fenomeno diffuso di *suffusion* e la sua successiva localizzazione in *piping* (Bendahmane et al., 2008; Chang e Zhang, 2013). Fra i vari fattori di influenza sull'intero processo sono stati individuati la struttura della terra (granulometria e porosità), il contenuto di fine, lo stato tensionale, le pressioni neutre e le condizioni di flusso idraulico (direzione e velocità). Il fenomeno di *suffusion* può essere osservato sull'elemento di volume rappresentativo, purché il percorso di flusso sia lungo, in modo da consentire l'eventuale rideposizione della particella. L'osservazione dell'evoluzione in *piping*, alla scala di laboratorio, richiede invece campioni di medie o grandi dimensioni, in modo che la localizzazione sia innescata più facilmente da disomogeneità naturali ed evolva fino al collasso locale o globale del campione (van Beek et al., 2011; Richards e Reddy, 2012).

3. Una nuova attrezzatura per prove su modello fisico a scala di laboratorio

Per analizzare il potenziale di erodibilità interna delle terre si è progettata e realizzata presso il Politecnico di Milano un'attrezzatura che consente di sottoporre a prova sia l'elemento di volume sia modelli fisici alla media scala di pendii e rilevati. E' costituita da una scatola prismatica con sezione di 32x26 cm e lunghezza di 130 cm, realizzata interamente in plexiglas di 15 mm di spessore, in modo da consentire la visuale sul campione in prova (Fig.1). La scatola è divisa internamente in tre camere, di cui quella centrale è occupata dal campione o dal modello, mentre le due laterali costituiscono i due serbatoi d'acqua con cui si controlla il regime idraulico, imponendo in essi il carico idraulico prefissato (Fig.2a). Le camere sono separate da pareti rigide microforate, che consentono la filtrazione di acqua e particelle fini e che possono essere fissate in varie posizioni in modo da riprodurre percorsi di flusso di diverse lunghezze, da un minimo di 18 cm ad un massimo di 98 cm.

L'acqua nelle camere laterali può essere messa in pressione attraverso valvole indipendenti, così da raggiungere elevati valori di gradiente idraulico e riprodurre vari percorsi di carico idraulico. Inoltre, l'intercapedine fra il coperchio superiore e la superficie del campione è riempita da una membrana in lattice che può essere pressurizzata, per applicare uno stato di confinamento verticale al campione e valutarne l'influenza sul fenomeno di erosione (Fig.2b).

La scatola può essere inclinata ruotandone la base attorno ad un albero basculante, con un comando a

leva manuale che agisce su un sistema di due moto riduttori accoppiati. Il campione può quindi essere ricostruito per deposizione di strati orizzontali nella scatola inizialmente inclinata fra 0° e 90° , agendo o dal coperchio superiore o da un coperchio situato su un estremo di essa, così che, una volta riposizionata in orizzontale, gli strati risultano inclinati rispetto alla direzione orizzontale del flusso (Fig.2c). Infine l'attrezzatura permette di analizzare anche modelli in scala di pendii e rilevati, che possono essere sottoposti a diverse condizioni di immersione e flusso, compresa la tracimazione in sommità (Fig.2d).

Il flusso di acqua e particelle erose è raccolto nel serbatoio di valle e quindi, attraverso un condotto con valvola, in un recipiente che può essere rimosso a intervalli prefissati senza che questo comporti una caduta di carico idraulico nel serbatoio di valle (Fig.1). Dopo aver raccolto la massa di particelle erose il recipiente viene riempito di acqua e nuovamente pressurizzato prima che la valvola venga riaperta. Sulle pareti sono posizionate due serie di fori filettati equidistanti, utilizzati o per fissare le pareti filtranti o per alloggiare piezometri o tensiometri per la misura delle pressioni neutre sulla lunghezza del campione.

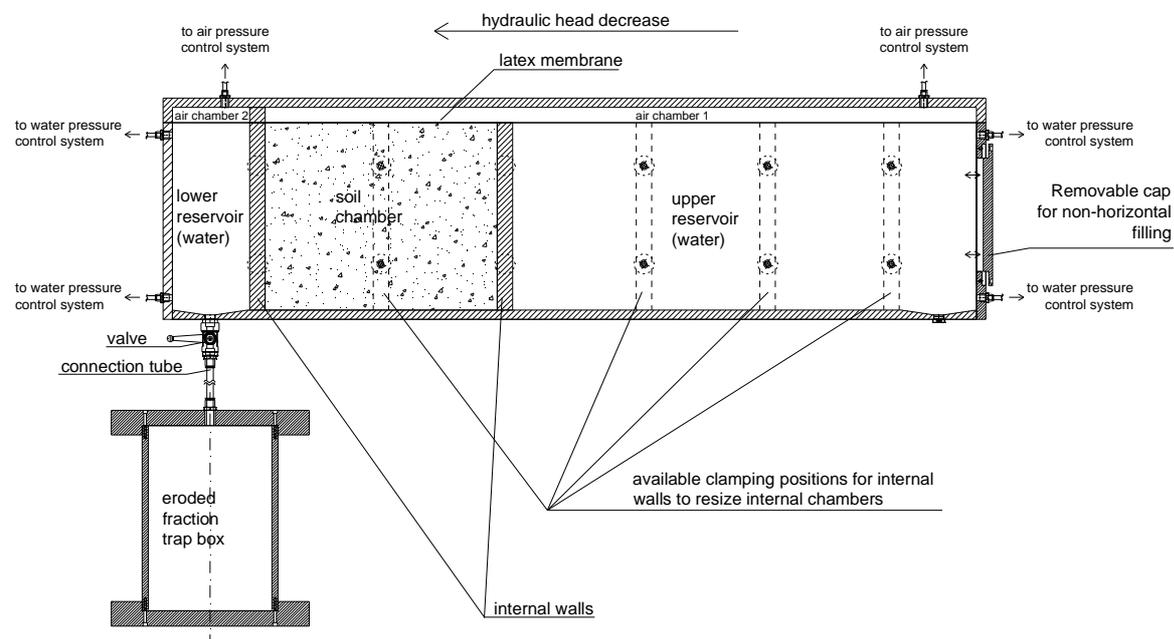


Fig 1. Schema dell'attrezzatura per la misura dell'erosione interna su un campione elementare

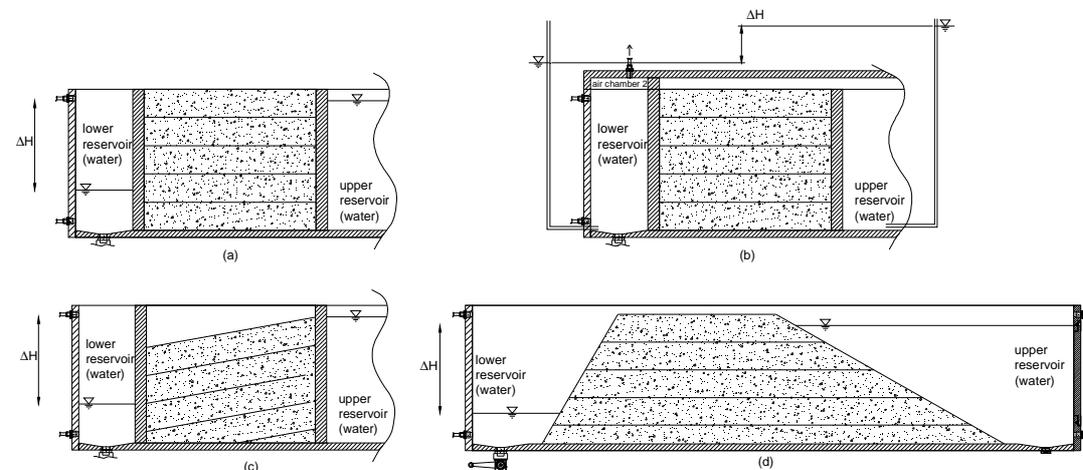


Fig 2. Esempi di utilizzo dell'attrezzatura: stratificazione orizzontale in regime non confinato (a) o confinato (b), stratificazione inclinata non parallela al flusso (c), modello di argine (d)

4. Prime prove di verifica della procedura

La prima serie di prove è stata condotta su un insieme di sferette di vetro di tre diverse classi (A = 2 mm, B = 0.57-0.70 mm, C = 0.07-0.11 mm, di cui solo la classe A è trattenuta dalle pareti filtranti), mescolate in modo da ottenere distribuzioni granulometriche prefissate, riproducibili e ideali. La gravità specifica è risultata pari a 2.49. Il vetro presenta anche il vantaggio di essere inerte rispetto alla variazione di contenuto d'acqua, e quindi di semplificare l'interpretazione dei risultati in termini di variazione di volume del campione non saturo nelle prove in regime di filtrazione non confinata.

La procedura di allestimento di questo tipo di prove (Fig.2a) consiste in (Celada e Magno, 2012):

- preparazione del campione all'interno della camera centrale di lunghezza predisposta, dopo averla isolata da fogli di plastica che coprono le pareti filtranti, per compattazione di materiale di umidità controllata e peso tale da riprodurre una densità relativa prefissata; la tecnica si è rivelata efficace nel garantire l'uniformità di addensamento anche per sfere di vetro;
- saturazione del campione con il riempimento graduale del serbatoio di monte e il sollevamento dei fogli di plastica; il processo di saturazione è monitorato dai piezometri alle due diverse quote (Fig.1) e deve avvenire per lenta infiltrazione d'acqua, in modo da evitare un inizio di erosione o la sedimentazione delle particelle più fini; a titolo di esempio, la saturazione di un campione mediamente addensato, di 28.5 cm di altezza e 38 cm di lunghezza, richiede 20 ore;
- abbassamento del livello d'acqua nel serbatoio di valle fino all'altezza prefissata; il regime di filtrazione è quindi controllato dalla differenza di carico idraulico, mentre la quantità di particelle erose e le pressioni neutre sono misurate come descritto.

La tabella 1 riassume le caratteristiche dei campioni (granulometria espressa con i valori percentuali delle tre classi) e le condizioni di flusso delle prime prove.

Tabella 1. Prime prove in regime di filtrazione non confinata.

Prova	Granulometria	e	$\frac{L}{\text{cm}}$	$\frac{\Delta H}{\text{cm}}$	I_m	Erosione	$\frac{q_f}{\text{m}^3/\text{s}}$	$\frac{k}{\text{m/s}}$
1	80 / 0 / 20	0.32	18	7.5	0.42	Sì	$3.4 \cdot 10^{-6}$	$1.05 \cdot 10^{-4}$
2	60 / 20 / 20	0.27	38	16	0.42	No	$6.9 \cdot 10^{-7}$	$2.30 \cdot 10^{-5}$
3	60 / 20 / 20	0.20	18	16	0.89	Sì	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$1.90 \cdot 10^{-5}$

Granulometria: A / B / C (%), e : indice dei vuoti, L : lunghezza del campione, ΔH : differenza di carico idraulico, $I_m = \Delta H/L$: gradiente idraulico medio, q_f : quantità di flusso d'acqua filtrante a regime, k : permeabilità stimata.

5. Primi risultati e discussione

Le prime prove sono state condotte al solo scopo di validare la procedura di prova e gli strumenti di controllo e misura delle variabili in gioco. I risultati, in termini di quantità di flusso d'acqua, pressioni neutre e massa di particelle erose, vanno quindi analizzati in termini sostanzialmente qualitativi.

La permeabilità è stata stimata da una back-analysis a Elementi Finiti del problema di filtrazione non confinata, utilizzando in ingresso le misure di flusso filtrante a regime e ipotizzando una curva di ritenzione e una relazione fra permeabilità e grado di saturazione. I valori ottenuti (Tab.1) sembrano coerenti con i materiali provati: nella prova 1 il materiale è facilmente erodibile (elevata porosità e doppia struttura particellare), da cui l'alto valore di permeabilità ottenuto; nelle prove 2 e 3 si sono ottenuti valori molto simili, nonostante si tratti dello stesso materiale a diverse porosità iniziali, coerentemente con il fatto che nella prova 3 la porosità, inizialmente bassa, aumenta durante un processo di erosione che nella prova 2 invece non si verifica.

Le misure di massa erosa nel tempo delle prove 1 e 3 differiscono notevolmente e non possono essere messe a confronto in quanto i materiali e le condizioni di flusso sono molto diversi (Tab.1). Il materiale della prova 1 è molto sensibile all'erosione ed è quindi sufficiente un gradiente idraulico limitato per rimuovere gran parte delle particelle fini di classe C (Fig.3a). La struttura particellare più

grossa appare stabile, in quanto non si sono osservati cedimenti né collassi locali del campione. L'aggiunta della classe B porta ad avere una struttura interna meno sensibile: assenza di erosione nella prova 2 ed erosione molto limitata nella 3 (Fig.3b). Si può anche notare che la velocità di erosione può essere variabile durante il processo, come mostrato dalla curva relativa alla classe C. L'assenza di erosione nella prova 2, pur essendo il materiale più poroso di quello della prova 3, può essere attribuita al minor gradiente idraulico, assumendo l'esistenza di una soglia di gradiente oltre la quale si innesca il fenomeno, oppure alla maggior lunghezza del percorso di flusso, che permette la rideposizione delle particelle erose prima che si completi il trasporto a valle. L'erosione può essere verificata a fine prova, misurando per setacciatura il contenuto di particelle delle diverse classi in diversi strati nel campione o diverse posizioni lungo il percorso di flusso. Come esempio, la Fig.4 mostra il contenuto di particelle delle classi B e C ottenute da strati a diverse altezze nel campione della prova 3. Mentre la classe B è distribuita in modo abbastanza uniforme, la classe C risulta effettivamente erosa e trasportata soprattutto nella metà inferiore del campione.

Con riferimento al concetto di stabilità interna, queste prime prove confermano che, in generale, la distribuzione granulometrica del mezzo non è l'unico fattore di influenza e che il potenziale di erodibilità dipende anche dalla porosità e dal gradiente idraulico.

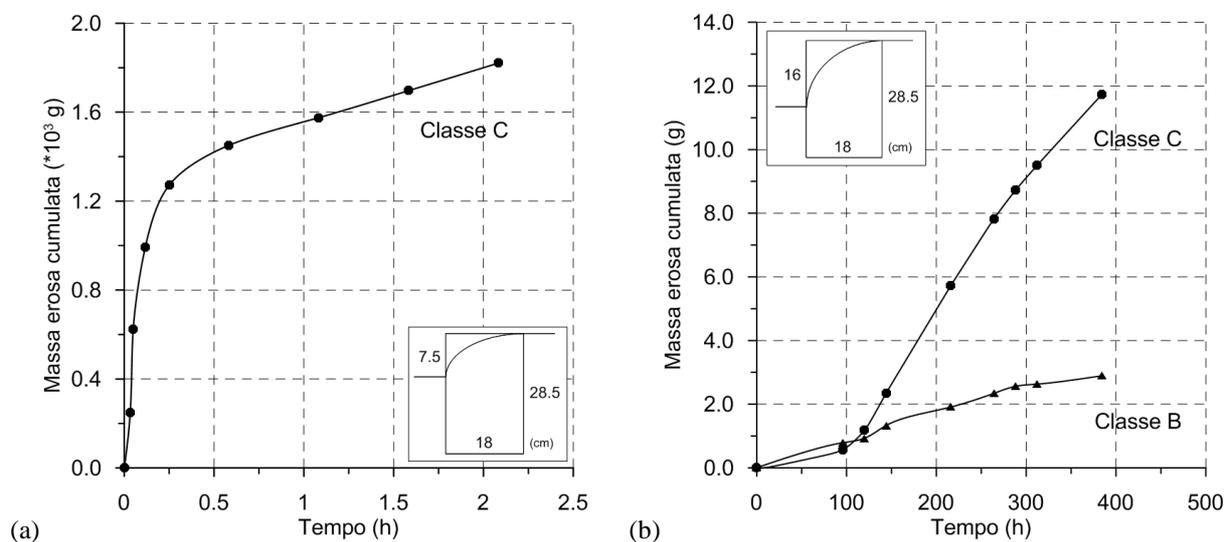


Fig 3. Massa erosa cumulata (a) nella prova 1 e (b) nella prova 3 (cf. Tabella 1)

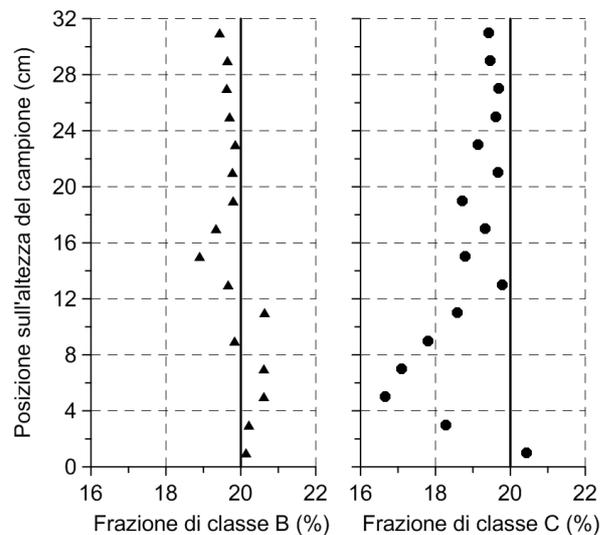


Fig 4. Distribuzione dei contenuti di fine di classe B e C sulla verticale del campione nella prova 3 (valore iniziale 20% per entrambi)

6. Conclusioni

Per studiare il processo di erosione interna e formazione di canali di flusso alla scala di laboratorio si è progettata e realizzata un'attrezzatura che, a partire da caratteristiche comuni ad altre attrezzature, introduce alcuni elementi innovativi, in particolare la possibilità di analizzare campioni di grandi dimensioni, campioni con stratificazione di assegnata inclinazione rispetto alla direzione di flusso, e modelli in scala ridotta di opere in terra o di interfacce suolo-struttura.

Le prove preliminari, condotte su sfere di vetro di varia granulometria, in regime di filtrazione non confinata, hanno consentito di definire una procedura di prova e una strumentazione idonea alla misura delle grandezze rilevanti. Gli approfondimenti successivi saranno dedicati a prove su materiali di natura diversa e in configurazioni diverse, in modo da definire con accuratezza le diverse procedure. Infine, si potranno condurre specifiche campagne di prova allo scopo di interpretare e modellare il fenomeno e la sua evoluzione nei suoi vari aspetti.

Ringraziamenti

La ricerca è in parte finanziata dal Ministero per l'Istruzione, l'Università e la Ricerca, nell'ambito del Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale PRIN 2010-11. Si ringraziano anche gli Ing. C.Celada e M.P.Magno per il lavoro sperimentale svolto.

Bibliografia

- Bendahmane F., Marot D., Alexis A. (2008). "Experimental parametric study of suffusion and backward erosion", *ASCE J. Geotech. Geoenv. Engng.* 134, 57-67.
- Celada C., Magno M.P. (2012). Progettazione e realizzazione di un modello a scala di laboratorio per lo studio dell'erosione in rilevati in terra. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Milano.
- Chang D.S., Zhang L.M. (2013). "Critical hydraulic gradients of internal erosion under complex stress states". *ASCE J. Geotech. Geoenv. Engng.* 139, 1454-1467.
- Fischer G.R., Holtz R.D. (1996). "A critical review of granular soil filter retention criteria", Proc. 2nd Int. Conf. Geofilters, (ed. Lafleur-Rollin), Ecole Polytechnic Montreal, 409-418.
- Fox G.A., Wilson G.V. (2010). "The role of subsurface flow in hillslope and stream bank erosion: a review". *Soil Science Soc. Am. J.* 74, 717-733
- Haghighi I., Chevalier C., Duc M., Guédon S., Reiffsteck P. (2013). "Improvement of hole erosion test and results on reference soils". *ASCE J. Geotech. Geoenv. Engng.* 139, 330-339.
- Ke L., Takahashi A. (2012). "Strength reduction of cohesionless soil due to internal erosion induced by one-dimensional upward seepage flow". *Soils & Foundations* 52, 698-711
- Kenney T.C., Lau D. (1985). "Internal stability of granular filters". *Can. Geotech. J.* 22, 215-225.
- Indraratna B., Radampola S. (2002). "Analysis of critical hydraulic gradient for particle movement in filtration". *ASCE J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 128, 347-350.
- Moffat R., Fannin R.J. (2011). "A hydromechanical relation governing internal stability of cohesionless soil". *Can. Geotech. J.* 48, 413-424.
- Richards K.S., Reddy K.R. (2012). "Experimental investigation of initiation of backward erosion piping in soils". *Géotechnique* 62, 933-942.
- Sterpi D. (2003). "Effects of the erosion and transport of fine particles due to seepage flow. *ASCE Int. J. Geomechanics* 1, 111-122.
- van Beek V.M., Knoeff H., Sellmeijer H. (2011). "Observations on the process of backward erosion piping in small-, medium- and full-scale experiments". *Europ. J. Environ. Civil Engng.*, 15, 1115-1137.
- Wan C.F., Fell R. (2004). "Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams". *ASCE J. Geotech. Geoenv. Engng.* 130, 373-380.
- Xiao M., Shwiyhat N. (2012). "Experimental investigation of the effects of suffusion on physical and geomechanic characteristics of sandy soils". *Geotech. Test. J.*, 35, 1-11.