

## **PROGETTAZIONE DEGLI APPARATI SPERIMENTALI PER LA MODELLAZIONE FISICA ALLA SCALA DI LABORATORIO DEI FENOMENI DI SOTTOFILTRAZIONE NEI RILEVATI ARGINALI**

Carmine Gerardo Gragnano

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna*  
[carmine.gragnano2@unibo.it](mailto:carmine.gragnano2@unibo.it) (Referente della nota)

Federico Camiletti

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna*  
[federico.camiletti@unibo.it](mailto:federico.camiletti@unibo.it)

Michela Marchi

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna*  
[michela.marchi@unibo.it](mailto:michela.marchi@unibo.it)

Laura Tonni

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna*  
[laura.tonni@unibo.it](mailto:laura.tonni@unibo.it)

### **Sommario**

La presente nota ha lo scopo di illustrare alcuni degli elementi principali del lavoro svolto per la realizzazione di prove di laboratorio volte alla modellazione fisica ed al monitoraggio dei fenomeni di erosione retrogressiva. Dopo una breve introduzione al problema in esame ed una descrizione del terreno oggetto di studio, saranno presentati gli schemi di prova e forniti alcuni dettagli sulla strumentazione finora impiegata. Si mostreranno, infine, alcune evidenze sperimentali che rilevano l'innescò e la propagazione dei processi erosivi, come emerso nelle prove attualmente in fase di svolgimento presso il laboratorio di geotecnica dell'Università di Bologna.

### **1. L'erosione retrogressiva nelle condizioni di sito**

Il fenomeno dell'erosione retrogressiva (*backward erosion piping*) è riconducibile ad un processo di erosione interna che genera la formazione di canali (*pipes*) nel terreno di fondazione delle strutture arginali in cui ha sede un moto di filtrazione: la particolarità di questo fenomeno è che la sua progressione avviene verso la sorgente del flusso, mentre l'area di innescò (o riattivazione) è collocata nella zona di efflusso. Lo studio del processo di erosione retrogressiva sotto gli argini riveste una particolare importanza per la protezione del territorio posto in prossimità dei corsi d'acqua in quanto, una volta innescato, il fenomeno può compromettere le condizioni di stabilità della struttura in terra. La pericolosità manifestata dall'innescò di un fenomeno di erosione retrogressiva è infatti dimostrata da numerosi casi di danneggiamenti e rotte arginali documentate in vari contesti fluviali. In Italia, numerosi fontanazzi sono osservabili lungo il corso del Po (Aielli et al., 2019) e di alcuni dei suoi principali affluenti, durante gli eventi di piena. Lo sviluppo del fenomeno è favorito in primo luogo dalla presenza di un acquifero poco profondo e confinato da uno strato superficiale di minor permeabilità. L'acquifero genera forti flussi di filtrazione verso valle, mentre lo strato superficiale "impermeabile" consente la formazione dei *pipes* al di sotto dell'argine. Inoltre, il progressivo innalzamento dei rilevati arginali ha prodotto l'instaurarsi di gradienti idraulici sempre più elevati, con conseguente maggior vulnerabilità nei confronti dell'erosione retrogressiva (Marchi et al., 2021). Numerosi sono i casi registrati anche al di fuori dell'Italia: le problematiche maggiori sono state

documentate in Olanda (van Beek, 2015), Ungheria, Stati Uniti (Robbins e van Beek, 2016) e Cina (Cao, 1994).

Le condizioni affinché si possa innescare il fenomeno di erosione retrogressiva sono schematizzate in Figura 1. Tali condizioni vanno ricercate, in primo luogo, nelle caratteristiche stratigrafiche dell'area: è necessaria la presenza di uno strato profondo ad elevata permeabilità (acquifero), confinato superiormente da un'unità di terreno a grana fine (*blanket*), pertanto poco permeabile. A questa condizione va aggiunta la presenza di un canale di risalita (una frattura nel terreno di origine naturale od antropica) che metta in comunicazione l'acquifero con il piano campagna lato valle. Il pipe verticale può formarsi a seguito del sollevamento locale dello strato argilloso superficiale, che generalmente avviene in corrispondenza di un locale assottigliamento del *blanket* o, condizione molto frequente, in corrispondenza di canali di scolo delle acque (fossi) nei pressi dell'argine. In presenza di un *pipe* verticale precedentemente formato, la riattivazione di un fontanazzo avviene a causa del raggiungimento di un elevato livello idrometrico trattenuto dal rilevato arginale (Fase 1 in Fig. 1). I primi indizi di erosione retrogressiva in sito sono riconducibili all'osservazione di materiale sabbioso trasportati dall'acquifero al piano campagna; man mano che il carico idraulico in alveo aumenta, la quantità di sabbia erosa tende ad aumentare, in funzione delle velocità di filtrazione, arrivando alla formazione di un fontanazzo chiaramente osservabile (Fase 2 in Fig. 1). Per valori del livello idrometrico significativamente elevati ed in assenza di interventi di mitigazione, il processo di erosione ha la possibilità di svilupparsi sotto l'argine, arretrando fino alla sorgente del moto di filtrazione (il bacino idrico) e quindi allargarsi ed approfondirsi (Fase 3 in Fig. 3). La persistenza e la successione di eventi di piena significativi possono portare all'indebolimento dello strato di fondazione del rilevato, fino ad un possibile collasso della struttura (Fase 4, Fig. 4) e all'apertura di una successiva breccia.

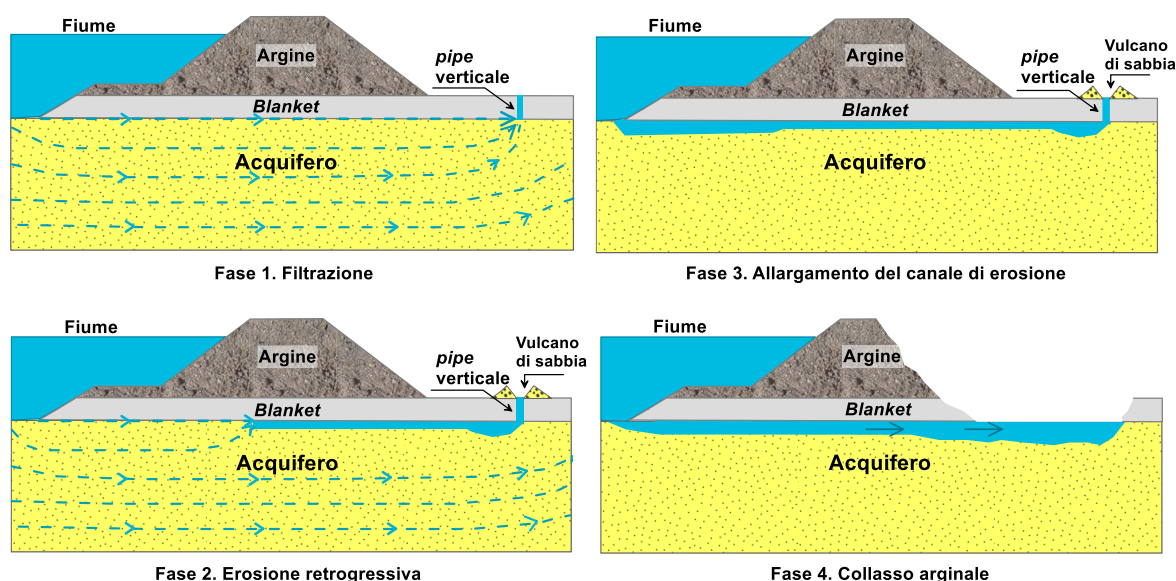


Fig 1. Fasi del backward erosion piping.

## 2. La modellazione fisica dell'erosione retrogressiva

Affinché il fenomeno erosivo sia interamente riproducibile in laboratorio, è necessario precedere alla realizzazione di un modello fisico per la simulazione di un processo di filtrazione, costituito dalle seguenti componenti: i) uno strato di terreno granulare, rappresentativo dell'acquifero all'interno del quale si sviluppa il *pipe* orizzontale; ii) un elemento di confinamento superiore del campione di terreno granulare, che riproduca il *blanket* e che sia, possibilmente, trasparente in modo da rendere visibile dall'esterno il processo erosivo sottostante; iii) un elemento che costituisca l'uscita del flusso,

in corrispondenza del quale il carico piezometrico è più basso di quello di monte; iv) un serbatoio idrico di monte, regolabile nei livelli ed in contatto idraulico con il terreno; v) un opportuno sistema di monitoraggio delle principali variabili osservabili.

La riproducibilità dell'erosione retrogressiva tramite sperimentazione di laboratorio è stata ampiamente sviluppata e testata nel corso degli ultimi decenni. Sono numerosi, infatti, gli studi sperimentali riportati in letteratura per la riproduzione del fenomeno tramite modelli fisici, sia in piccola sia in scala medio-grande. Di essi, così come di altri esperimenti in vera grandezza, si trova menzione nel database realizzato congiuntamente dall'USACE e dall'ente olandese Rijkswaterstaat (<https://www.pipingdb-rws-coe.nl/>). Sebbene sia stata raggiunta una grande esperienza nella modellazione fisica del fenomeno, numerose questioni restano ancora aperte e sono principalmente legate all'influenza dell'eterogeneità del terreno, dei fattori di scala dimensionali e temporale (Rice et al., 2021). Allo stesso tempo, c'è una sostanziale carenza di studi finalizzati allo sviluppo di soluzioni innovative e a basso impatto ambientale, capaci di bloccare la progressione del fenomeno erosivo. A questo proposito, è stato recentemente avviato il progetto europeo *LIFE SandBoil*, il cui obiettivo è quello di sviluppare una tecnologia per la mitigazione dell'erosione retrogressiva sotto le strutture arginali. Il progetto prevede attività di sperimentazione in laboratorio, attraverso modellazione fisica in piccola e media scala, ed in sito, presso un'area di prova in cui sarà costruito un argine allo scopo di validare la tecnologia in vera grandezza. Nei paragrafi che seguono si forniranno alcuni dettagli della sperimentazione in laboratorio in corso di svolgimento.

### 3. La realizzazione di un nuovo modello in laboratorio

L'attività sperimentale in corso si prefigge di raggiungere un'adeguata comprensione del processo di erosione retrogressiva, utile per la successiva definizione di opportune misure di mitigazione del fenomeno in esame. In una prima fase, è stato realizzato presso il laboratorio del dipartimento DICAM (Università di Bologna) un apparato sperimentale di dimensioni ridotte, al fine di individuare con maggiore facilità le procedure ottimali per l'allestimento del modello e l'esecuzione delle prove, da adottare successivamente in un modello fisico di maggiori dimensioni. In questa fase dell'attività sperimentale si è dedicata particolare attenzione alla preparazione del provino di sabbia, che deve simulare il comportamento dell'acquifero padano interessato dal processo erosivo.

#### 3.1 Modellazione dell'acquifero

Per la modellazione dell'acquifero è stata presa in considerazione una sabbia riconducibile all'acquifero padano. Si tratta di una sabbia omogenea, disponibile presso fornitore, caratterizzata da un valore di  $D_{50} = 0.34$  mm, coefficiente di uniformità  $C_u = 2.1$ , coefficiente di curvatura  $C_c = 1.2$  e da una percentuale di fine genericamente inferiore all'1%. I valori di  $\gamma_{min}$  e  $\gamma_{max}$ , ottenuti secondo le indicazioni ASTM, sono risultati rispettivamente pari a  $13.5 \text{ kN/m}^3$  e  $16.5 \text{ kN/m}^3$ . Il grado di addensamento del terreno nel sito di riferimento (acquiferi superficiali padani del medio e basso corso del Po) è tipicamente descritto da valori di densità relativa dell'ordine del 35%-50%, pertanto la preparazione del provino di sabbia è stata messa a punto con l'obiettivo di ottenere un substrato di media densità, in accordo con l'intervallo specificato sopra.

Varie tecniche di preparazione dei campioni sono state prese in considerazione e testate. Come noto, nel caso in cui il provino venga ricostituito mediante deposizione pluviale a secco, bisogna tenere in considerazione che sia l'altezza di caduta, sia l'intensità di deposizione hanno significativa influenza sulla densità finale dell'aggregato (Fig. 2). Con questo tipo di deposizione, il raggiungimento della completa saturazione del substrato risulta particolarmente onerosa e richiede il ricorso a cicli di depressione o flusso di  $\text{CO}_2$ , così come suggerito anche da Allan (2018).

Tale svantaggio non è, invece, riscontrabile nel metodo di preparazione noto come "deposizione in acqua". In questa procedura, la velocità iniziale di una particella sferica che viene a contatto con la

superficie d'acqua viene quasi immediatamente dissipata e pochi cm di sommersione sono genericamente sufficienti a garantire una velocità di sedimentazione omogenea: questo comporta, come osservabile anche dalla Fig. 2, l'ottenimento di un modello avente densità praticamente indipendente dall'altezza di caduta e dall'intensità di deposizione. Per il caso considerato, la densità relativa raggiungibile con questa procedura si attesta su valori compresi nell'intervallo 15%-25%, con un grado di saturazione mai inferiore al 95%. I valori ottenuti sono peraltro in accordo con quelli mostrati in letteratura.

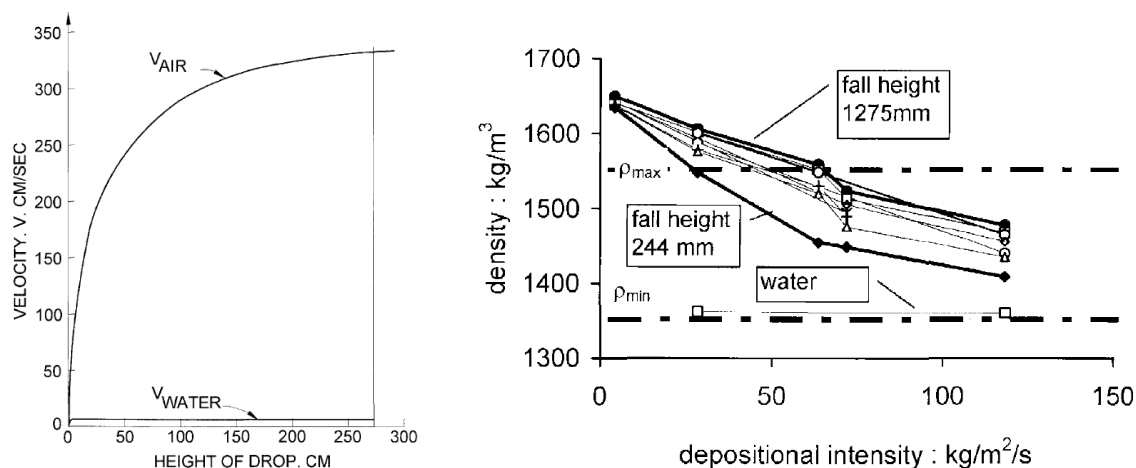


Fig 2. Dipendenza della velocità dall'altezza di caduta di sfere di diametro 0.4 mm in aria e acqua (sinistra) e influenza dell'intensità di deposizione ed altezza di caduta sulla densità del campione (da Lagioia et al., 2006).

Alla fine della deposizione, per addensare il provino di sabbia fino al raggiungimento del valore target di densità relativa, si è fatto ricorso ad una vibrazione trasmessa alla base di supporto dell'intero modello, prodotta dalla rotazione di un carico eccentrico all'interno di un motore. In questo modo si è ottenuto un deposito di terreno sufficientemente omogeneo, con densità rappresentative delle condizioni di sito.

### 3.2 Il contorno superiore e l'area d'uscita

Poiché il fenomeno di erosione avviene al contatto tra lo strato permeabile (acquifero) ed uno strato di confinamento superiore (*blanket*), a partire da un punto di uscita del moto di filtrazione collocato lato campagna, nella definizione del modello fisico è necessario prevedere la presenza di una superficie superiore impermeabile che presenti un punto di uscita del flusso. A tal scopo, la parte superiore del modello è stata realizzata in acrilico trasparente, in modo da rendere l'innesco e la progressione dell'intero fenomeno visibile durante lo svolgimento delle prove, a differenza di quanto avviene in sito. Affinché il processo erosivo sia correttamente modellato, è necessario garantire una perfetta aderenza tra le due superfici (permeabile/impermeabile), nonché evitare fenomeni di filtrazione localizzati ai bordi del modello; quest'ultimo aspetto può essere agevolmente garantito dall'utilizzo di fango bentonitico (disposto al contenuto umido del 400%) lungo i contorni superiori della superficie in plexiglass (Fig. 3, sinistra), mentre l'aderenza è conseguita grazie alla preparazione di uno strato di sabbia quanto più possibile omogeneo e livellato, unitamente all'uso di un foglio di materiale deformabile e trasparente (es. gomma) interposto tra sabbia e acrilico e alla leggera compressione del coperchio del modello sul provino di sabbia.

La presenza di un foro di uscita consente la concentrazione delle linee di filtrazione, con la possibilità di raggiungere i valori di gradiente idraulico che generano l'innesco e la progressione del fenomeno di erosione retrogressiva. La tipologia di uscita scelta nel presente studio è costituita da un foro circolare, con spessore pari a quello del pannello in acrilico, tale da rappresentare al meglio le condizioni in sito

nel caso di fontanazzi e da massimizzare le velocità del flusso in uscita. Al di sopra del foro è previsto un cilindro (Fig. 3, destra) avente la funzione di contenere il cratere che si forma in conseguenza dell'erosione della sabbia e di raccogliere l'acqua in uscita che dovrà poi essere fatta defluire.



*Fig 3. Dettagli della superficie superiore a contatto con la sabbia (sinistra) e del foro di uscita durante lo sviluppo di un canale di erosione.*

### **3.3 Il sistema di carico idraulico a monte**

Al fine di poter generare un fenomeno di filtrazione all'interno dell'intera unità di terreno, è necessario prevedere un sistema di distribuzione dei carichi idraulici in una sezione posta a monte del modello. Il sistema idraulico ha, infatti, la funzione principale di imporre una differenza di carico tra i punti di ingresso e di uscita, in modo da ottenere il gradiente idraulico necessario alla formazione e progressione dell'erosione retrogressiva. Questo gradiente genera una determinata portata di filtrazione, pertanto il sistema dovrà alimentare il flusso provvedendo alla portata in ingresso e a raccogliere, misurare e far defluire la portata in uscita. Diversi layout del sistema idraulico sono stati ipotizzati e testati a tal scopo: tutte le soluzioni considerate sono comunque basate sull'utilizzo di un serbatoio in cui il livello viene mantenuto costante con un sistema a sfioro della portata in eccesso, insieme ad un sistema di regolazione del carico che avviene spostando in elevazione il serbatoio. Per ridurre la turbolenza e ottenere una distribuzione omogenea delle linee di flusso, nella sezione di ingresso del modello è stato inserito un filtro costituito da un geotessuto, ancorato ad una piastra forata di separazione con lo strato di sabbia.

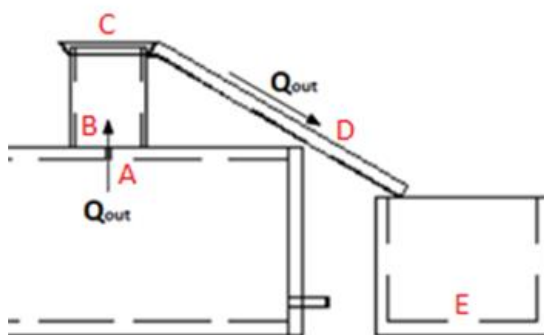
## **4. Il monitoraggio delle variabili osservabili**

Le principali variabili misurabili durante gli esperimenti sono la distribuzione di pressioni neutre e i valori di portata filtranti attraverso il modello. I valori di pressioni neutre possono essere determinati utilizzando le misure piezometriche effettuate in una serie di punti di controllo posti al contatto con la superficie superiore, nella quale sono presenti piccoli fori che consentono il collegamento idraulico con strumentazione di monitoraggio ma che non costituiscono punti di deflusso. In una fase iniziale, le misure sono state effettuate combinando tubi piezometrici con trasduttori di pressione (Fig. 4, sinistra); tuttavia, si è osservato che le variazioni di livello osservabili nei tubi piezometrici non sono abbastanza rapide per consentire un monitoraggio accurato e pertanto rappresentativo del fenomeno che, quando è in fase di progressione, può provocare delle importanti variazioni istantanee di pressione neutra nell'unità di sabbia al procedere dell'erosione.

Per quanto riguarda il sistema idraulico in uscita dal contenitore in plexiglass (Fig. 4, destra), l'acqua che passa attraverso il foro di uscita (A) ed il cilindro (B), raggiunge un livello di sfioro (C), la cui soglia indica anche il carico di valle del fenomeno di filtrazione, e deve poi essere convogliata (D) verso la vasca di raccolta (E). La portata deve essere monitorata durante l'intero svolgimento della prova, in virtù del suo andamento crescente conseguente sia all'incremento del carico idraulico



applicato, sia alla formazione dei *pipes*. Un metodo comunemente adottato per la determinazione della portata consiste nell'utilizzo di celle di carico per la misura in continuo del peso cumulato dell'acqua che durante la prova attraversa il modello e si raccoglie nella vasca di raccolta (E).



*Fig. 4. Foto dell'impianto di monitoraggio delle pressioni neutre (sinistra) e schema del sistema idraulico in uscita (destra).*

## 5. Considerazioni conclusive

Nella presente nota sono state fornite sintetiche informazioni sulla messa a punto di un modello fisico per lo studio del processo di erosione retrogressiva, che interessa ampi tratti del sistema arginale del fiume Po. Sono stati illustrati, in particolare, alcuni aspetti della preparazione del provino con il quale si intende simulare l'acquifero padano e sono stati presentati alcuni dettagli dell'apparato sperimentale in piccola scala attualmente in uso. La sperimentazione descritta si inserisce all'interno di un progetto di ricerca il cui scopo è la messa a punto di una tecnologia per la mitigazione del processo di erosione.

## Fonti di finanziamento

Il presente lavoro è stato realizzato nell'ambito delle attività del progetto LIFE SandBoil (LIFE19 ENV/IT/000071), finanziato dall'Unione Europea (*LIFE Environment and Resource Efficiency*).

## Bibliografia

- Aielli, S., Pavan, S., Parodi, S., Rosso, A., Tanda, M. G., Marchi, M., Vezzoli, G., Pantano, A., Losa, D., Sirtori, M. (2019). "Collection and analysis of the reactivation data of the historical sand boils in the po river levees". EWG-IE 2018: Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees pp 327–335.
- Allan R.J. (2018). "Backward Erosion Piping". PhD dissertation, The University of New South Wales, Sidney, Australia.
- Cao D. (1994). "Countermeasures for seepage erosion of Yangtze River main dikes". *Yangtze River*, 25(1):25-30.
- Lagioia R., Sanzeni A., Colleselli F. (2006). "Air, Water and Vacuum Pluviation of Sand Specimens for the Triaxial Apparatus". *Soils and Foundations*, 46(1): 61-67.
- Marchi M., García Martínez M.F., Gottardi G., Tonni L. (2021). "Field measurements on a large natural sand boil along the river Po, Italy". *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* (2021) 54 (4): qjeh2020-097.
- Rice J., Van Beek V.M., Bezuijen A. (2021). "History and Future of Backward Erosion Research". Proc. 10<sup>th</sup> International Conference on Scour and Erosion ICSE-10, virtual meeting.
- Robbins B.A., van Beek V.M. (2016). "Backward Erosion Piping: A Historical Review and Discussion of Influential Factors". Proc. ASDO Dam Safety Conference, New Orleans, LA.
- Van Beek V.M. (2015). "Backward Erosion Piping: Initiation and Progression". PhD dissertation, Technische Universiteit Delft, Delft, the Netherland.