

Caratterizzazione geotecnica e monitoraggio degli argini fluviali per l'analisi della suscettibilità al sifonamento

L. Tonni, M. Marchi, E. Dodaro, I. Bertolini, G. Gottardi

Alma Mater Studiorum-Università di Bologna

SOMMARIO: La presenza dei fontanazzi lungo gli argini fluviali, ossia di zone di fuoriuscita di sabbia fluidificata che si accumula sul piano campagna, rappresenta il tipico indizio dell'innesco e della progressione di un processo noto come "erosione retrogressiva per sottofiltrazione". Il fenomeno, caratterizzato dalla formazione di piccoli canali che dal piede dell'argine si sviluppano a ritroso verso il fiume, può condurre alla rottura arginale. Specifiche condizioni stratigrafiche predispongono all'insorgenza di questo processo, generalmente legato agli eventi di piena. In Italia, lungo il fiume Po, sono stati rilevati oltre 130 fontanazzi. Fra i tratti arginali più documentati vi è quello di Boretto, con fontanazzi "storici" e "relitti". La presente memoria descrive le numerose informazioni raccolte per questo sito mediante indagini geotecniche e attività di monitoraggio, e discute l'affidabilità di noti metodi di analisi per valutare la suscettibilità arginale al sifonamento.

1 INTRODUZIONE

I processi di erosione retrogressiva per filtrazione sotto le strutture arginali, spesso indicati in letteratura con l'espressione *backward erosion piping*, rappresentano una delle principali cause di dissesto ed instabilità degli argini fluviali. L'innesco e la progressione di questo processo erosivo sono tipicamente rivelati dalla presenza dei cosiddetti "fontanazzi" al piede degli argini, ossia zone di fuoriuscita di sabbia fluidificata che si deposita in superficie durante gli eventi di piena, formando il classico "vulcano di sabbia". Le diverse fasi che caratterizzano il meccanismo di erosione, identificate grazie ai numerosi studi sperimentali degli ultimi anni (e.g., Van Beek, 2015; Vandenboer et al., 2018), sono descritte negli schemi di Figura 1: a partire da un punto di uscita sul lato campagna, l'erosione delle particelle di sabbia si sviluppa sul tetto dell'acquifero, in direzione opposta al moto di filtrazione, conducendo alla formazione di un singolo condotto o una rete di piccoli condotti (*pipes*) sotto l'argine. L'eventuale connessione tra l'alveo e il foro di uscita determina un'accelerazione del processo di erosione, provocando l'allargamento e l'approfondimento dei *pipes*: a questo stadio, il processo può portare ad un collasso strutturale generalmente indicato con il termine "sifonamento" o *piping*. In molti casi, i carichi idraulici necessari per la progressione del *pipe* fino all'argine non vengono raggiunti. Tuttavia, ripetute riattivazioni di un fontanazzo possono far sì che i *pipes* si allarghino e si approfondiscano, con conseguente riduzione dei livelli di acqua in alveo capaci di determinare il re-innesco del fenomeno in una medesima sezione arginale.

In letteratura sono riportati numerosi casi di instabilità arginale attribuibili ad erosione retrogressiva per sottofiltrazione (e.g., Van Beek, 2015; Zhou et al., 2021). In Italia, uno studio condotto dall'Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po (AdBPo, 2005) ha ipotizzato l'esistenza di circa 30 brecce dovute a *piping* lungo il fiume Po, nel periodo compreso tra il 1800 e il 2000, anche se questa stima si riferisce a diversi tipi di erosione interna e non esclusivamente all'erosione retrogressiva per sottofiltrazione. Negli ultimi decenni, le attività di monitoraggio e le strategie di mitigazione adottate contro le alluvioni, unite a misure di emergenza ben

consolidate, si sono dimostrate generalmente efficaci nel prevenire i collassi arginali; tuttavia importanti manifestazioni di erosione per sottofiltrazione vengono regolarmente rilevate durante gli eventi di piena lungo le strutture arginali di molti grandi fiumi, quali ad esempio il Danubio, il Reno, la Mosa, il Mississippi (USACE, 2012; Semmens & Zhou, 2019). In Italia, lungo il tratto medio-basso del fiume Po, sono stati censiti negli ultimi decenni oltre 130 fontanazzi (Tonni et al., 2024), alcuni dei quali anche di notevoli dimensioni e soggetti a frequenti riattivazioni. In particolare, durante l'importante evento di piena del 2000, gran parte di essi si è riattivata contemporaneamente, con un significativo rischio per la sicurezza del territorio circostante, densamente popolato ed economicamente strategico.

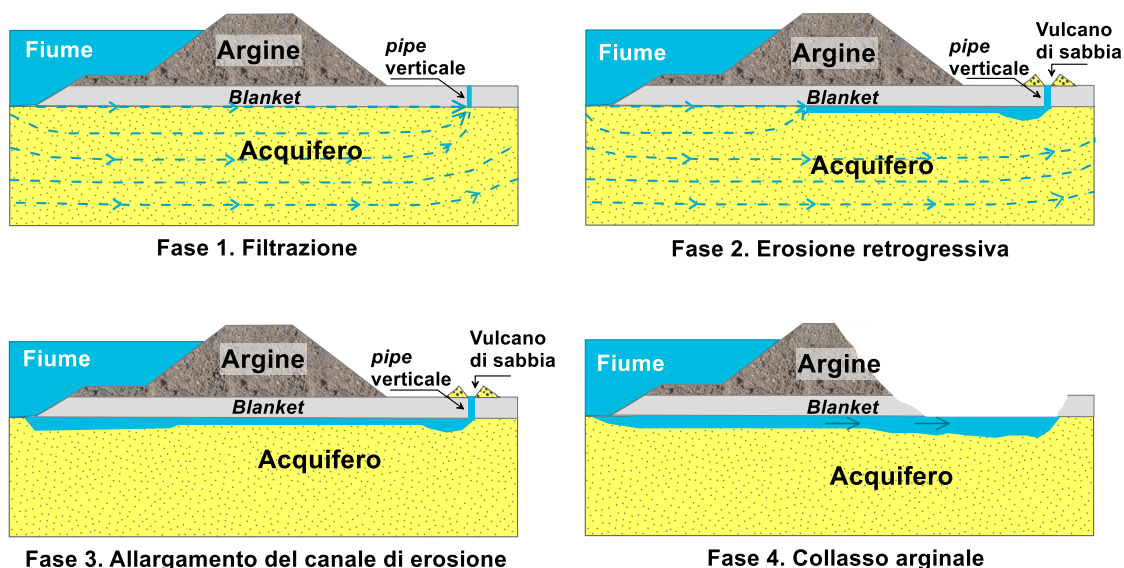


Figura 1. Fasi dell'erosione retrogressiva per sottofiltrazione: 1) innesco del fenomeno con fluidificazione della sabbia alla base del *pipe* verticale, in prossimità del piede dell'argine; 2) erosione retrogressiva; 3) progressione del condotto orizzontale sotto l'argine fino all'alveo; 4) allargamento ed approfondimento del condotto orizzontale e collasso della struttura arginale.

In virtù dell'incidenza del fenomeno, negli ultimi anni sono state svolte accurate campagne di indagini geotecniche e di monitoraggio in corrispondenza di sezioni del Po ritenute particolarmente critiche (e.g. Bertolini et al. 2022), allo scopo di ottenere informazioni sulla geometria dell'argine, sull'assetto stratigrafico, sulle proprietà geotecniche ed idrauliche del substrato di fondazione, così come sui carichi idraulici di attivazione/riattivazione dei processi erosivi e sulla tipologia e severità delle manifestazioni superficiali. Queste informazioni risultano essere dati di input cruciali per l'applicazione di metodi analitici abitualmente utilizzati per la valutazione della suscettibilità al *piping* delle sezioni arginali, ma anche per lo sviluppo di affidabili modelli numerici. Più in generale, esse sono di supporto per l'identificazione delle condizioni locali predisponenti e di quelle di innesco del processo erosivo, permettendo di assegnare classi di rischio ai diversi tratti arginali e di definire le priorità per gli interventi di mitigazione. È in quest'ottica che l'Agenzia Interregionale per il fiume Po (AIPo), nell'ambito del progetto europeo LIFE SandBoil, ha recentemente messo a punto un database dei fontanazzi (Tonni et al., 2024), ossia uno strumento di catalogazione in ambiente GIS di tutte le manifestazioni di *piping* lungo il Po, che permette di archiviare in maniera strutturata le informazioni sopra menzionate, correlandole fra loro.

Uno dei tratti arginali del Po più studiati ricade nel territorio di Boretto, in provincia di Reggio Emilia. La presenza di numerosi fontanazzi e le diffuse aree di filtrazione fanno di Boretto un caso studio emblematico per l'analisi delle dinamiche di erosione retrogressiva e per una valutazione critica degli approcci matematici attualmente disponibili in letteratura. Il presente articolo descrive pertanto le principali informazioni ottenute dalle numerose indagini geognostiche ivi condotte, dal monitoraggio piezometrico, dall'osservazione diretta dei fontanazzi in attività e discute l'affidabilità di due noti metodi di analisi per la valutazione della suscettibilità arginale al *piping*.

2 I FONTANAZZI DI BORETTO

Il tratto arginale oggetto della presente memoria ricade in un segmento del fiume Po con una documentata storia di *piping*. Negli anni '90, lungo tratti selezionati fra Brescello e Luzzara, furono installati dei diaframmi come strategia di mitigazione del fenomeno di erosione retrogressiva e contestualmente le strutture arginali furono rialzate e rinforzate per ottemperare ai requisiti geometrici definiti dalle direttive dell'Autorità di Bacino. Sebbene tali interventi si siano in generale rivelati efficaci nel contrastare i fenomeni di *piping*, il tratto di Boretto continua ad essere interessato da riattivazioni di fontanazzi e manifestazioni di sottofiltrazione (Figura 2a). La Figura 2b mostra il principale fontanazzo presente nell'area, catalogato nel database di AIPo con codice #36(2), durante la sua riattivazione in occasione della piena di novembre 2014. Il carico idraulico netto che determinò la riattivazione risultò pari a 5.6 m. Come da procedura consolidata, nella fase di emergenza fu predisposto un anello di sacchi di sabbia attorno al fontanazzo, per fermare il trasporto in superficie delle particelle sabbiose dell'acquifero. Le misure effettuate in questa fase indicarono un diametro del *pipe verticale* dell'ordine di 50 cm, mentre il diametro del vulcano creato dalla sabbia erosa e trasportata in superficie dall'acqua risultò essere di circa 15 m.

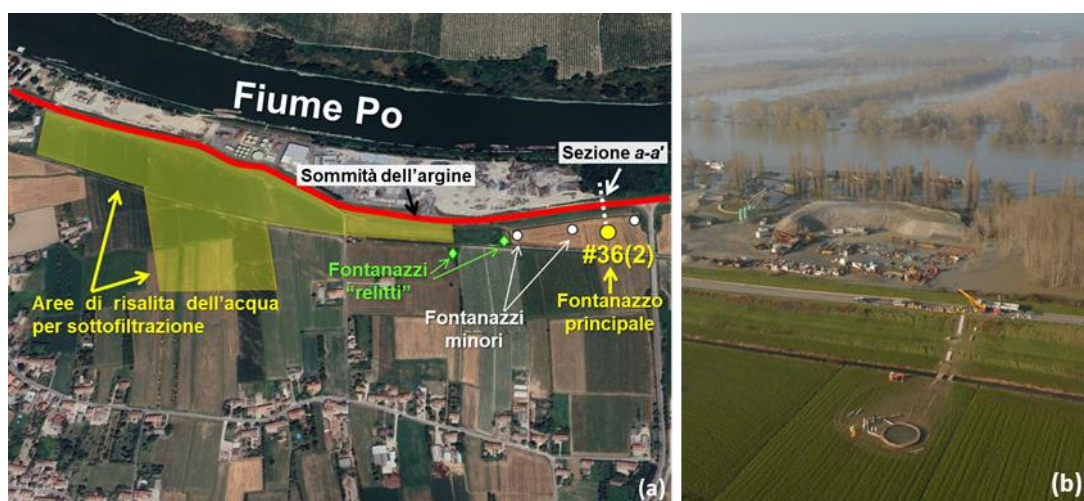


Figura 2. a) Tratto del fiume Po nel territorio di Boretto, con la posizione dei fontanazzi e delle aree di risalita dell'acqua in superficie per sottofiltrazione. I cerchi indicano i fontanazzi ancora soggetti a riattivazioni, mentre i rombi corrispondono a fontanazzi "relitti", ossia non attivi da almeno 25 anni; b) Vista aerea del principale fontanazzo nell'area di Boretto. (Immagine del Corpo Nazionale V.V.F.).

3 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DELL'ARGINE

La disponibilità di un numero relativamente elevato di sondaggi, di prove penetrometriche con piezocono (CPTU) e prove di permeabilità, unitamente ai risultati di prove di laboratorio per lo più finalizzate alla caratterizzazione fisica dei terreni, ha permesso di ricostruire con notevole dettaglio l'assetto stratigrafico di questo tratto arginale e di determinare le proprietà dei terreni coinvolti nel meccanismo di erosione retrogressiva.

Il modello stratigrafico riportato in Figura 3 fa riferimento alla sezione trasversale *a-a'*, tracciata in corrispondenza del fontanazzo principale. I terreni che caratterizzano il substrato di fondazione del sistema arginale sono sostanzialmente riconducibili ai tipici depositi di pianura alluvionale accumulatisi in sistemi a meandro. Sono state complessivamente identificate cinque diverse unità stratigrafiche: i) l'Unità R, costituita da una complessa alternanza di sabbie, sabbie limose e limi argillosi, coincidente con il corpo arginale; ii) l'Unità A, corrispondente ad un corpo sabbioso di canale fluviale denominato "Acquifero Padano" e costituito da sabbie con granulometria variabile da medio-fine a grossolana, talvolta con piccole quantità di limo negli strati più superficiali; iii) l'Unità B, prevalentemente limosa, riferibile a depositi di argine e rotta

fluviale; iv) l'Unità C, prevalentemente argillosa, di spessore variabile da 4 a 10 m e costituita da depositi di piana inondabile; v) depositi golenali a grana fine dell'Unità D.

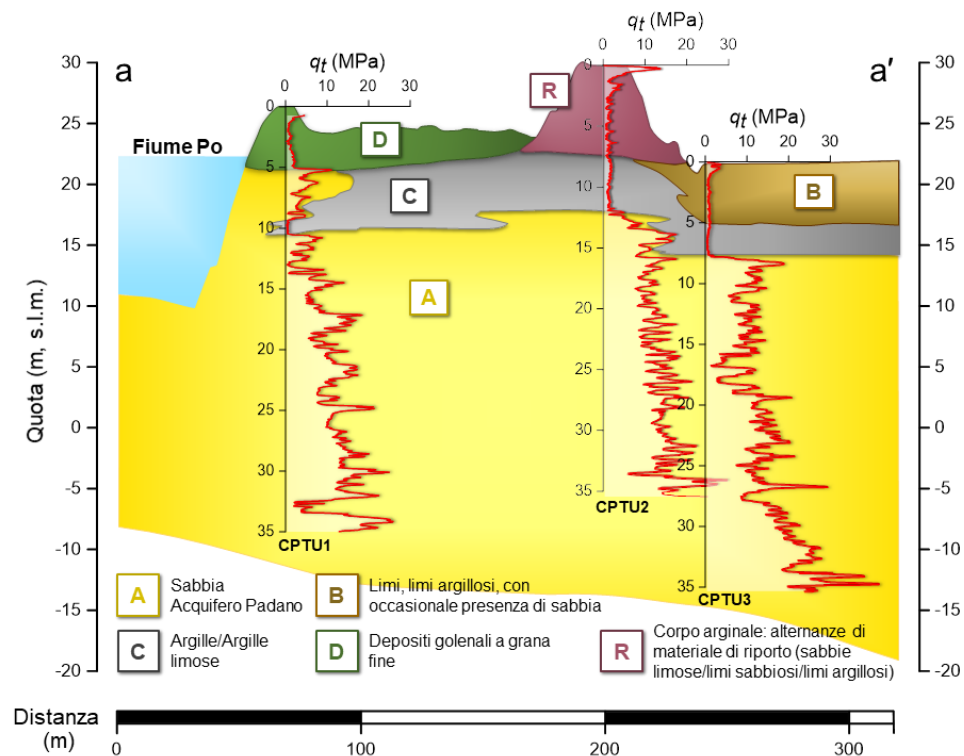


Figura 3. Modello stratigrafico del tratto arginale oggetto di studio (sezione trasversale a-a' di Figura 2a). Le scale di rappresentazione orizzontale e verticale stanno nel rapporto 1:5.

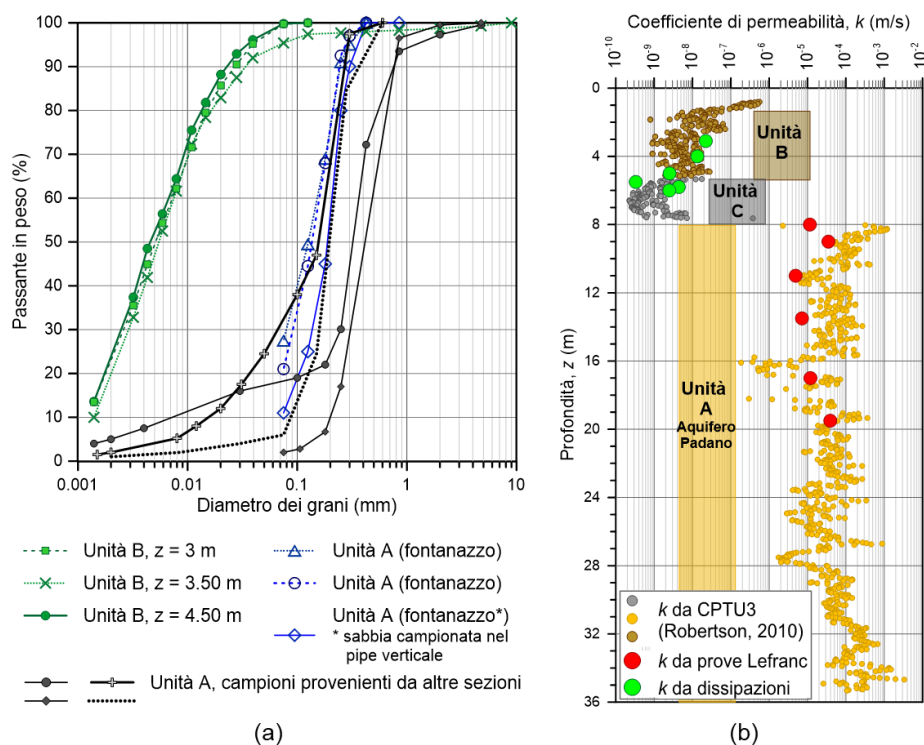


Figura 4. (a) Distribuzione granulometrica dei campioni di terreno prelevati dalle unità stratigrafiche A e B; (b) Valori di permeabilità ottenuti da interpretazione di prove penetrometriche con piezocono (CPTU3) e confronto con determinazioni da prove Lefranc e prove di dissipazione.

Le analisi granulometriche, effettuate su alcuni campioni ottenuti da un vicino sondaggio e riportate in Figura 4a, hanno confermato la prevalenza della frazione limosa nell'Unità B. Nella stessa figura, le curve granulometriche riferite all'Unità A, sebbene ottenute su campioni prelevati a qualche chilometro di distanza dall'area in esame, indicano che la porzione superiore dell'Acquifero Padano è tipicamente composta da sabbie uniformi di granulometria medio-fine. Per un utile confronto, sono state riportate anche le distribuzioni granulometriche della sabbia erosa, sia quella accumulatasi nel vulcano attorno al punto di uscita, sia quella fluidificata all'interno del *pipe* verticale, durante la riattivazione del fontanazzo #36(2) di novembre 2019.

I valori di permeabilità k delle unità stratigrafiche di interesse per il meccanismo di erosione (ossia le unità A, B e C) sono stati stimati dalle prove CPTU, secondo note correlazioni empiriche (Robertson, 2010) basate sull'indice di materiale I_{cn} , e messi a confronto con determinazioni indipendenti ottenute da prove di permeabilità Lefranc e da prove di dissipazione. Dalla Figura 4b, che mostra il profilo di k calcolato sulle misure della prova CPTU3 eseguita al piede dell'argine, appare evidente il buon accordo tra le stime fornite dai diversi metodi, a conferma di quanto già osservato da Bertolini et al. (2022) per i sedimenti della Pianura del Po, in corrispondenza di altri tratti arginali oggetto di studio. I valori medi di $\log_{10}k$ ottenuti dall'intero set di prove CPTU sono risultati pari a -4.73 per l'Unità A, -7.81 per l'Unità B e -8.93 per l'Unità C, corrispondenti rispettivamente a valori di k pari a $1.87 \cdot 10^{-5}$ m/s, $1.53 \cdot 10^{-8}$ m/s, e $1.17 \cdot 10^{-9}$ m/s. Pertanto, sulla base del modello stratigrafico proposto e dei valori di permeabilità sopra indicati, l'unità argillosa C e la soprastante unità limo-argillosa B costituiscono complessivamente uno strato superficiale poco permeabile, denominato *blanket*, che condiziona il processo di sottofiltrazione e la conseguente pressione interstiziale nell'acquifero, lato campagna. Dall'esame delle verticali di indagine disponibili, distribuite su un tratto di circa 1 km, si è osservato che lo spessore del *blanket* in prossimità del piede dell'argine varia sensibilmente e tende a ridursi in corrispondenza del sito oggetto di analisi, creando pertanto condizioni indubbiamente favorevoli per l'innesco dei fenomeni di erosione retrogressiva ivi osservati.

Infine, il monitoraggio piezometrico eseguito nell'ambito di uno studio a larga scala ha permesso di identificare in quest'area una falda freatica situata nei sedimenti prevalentemente limosi dell'unità B e una falda confinata sub-artesiana, corrispondente all'Acquifero Padano, direttamente connessa con il fiume e ben sincronizzata con esso anche a distanze significative. Gli incrementi di pressione determinati dal livello dell'acqua in alveo, durante le piene, favoriscono pertanto l'innesco del *piping*. I dati raccolti hanno dimostrato inoltre che il livello piezometrico nell'acquifero confinato risulta generalmente essere da 2 a 5 m più basso della superficie freatica; solo durante gli eventi di piena più significativi la posizione relativa dei livelli piezometrici delle due falde si inverte.

4 VERIFICHE DI SUSCETTIBILITÀ AL PIPING

4.1 Il metodo “blanket”

Come noto, i criteri per l'innesco e la progressione dell'erosione retrogressiva per sottofiltrazione possono essere correlati alle condizioni idrauliche locali nella sezione di uscita, in prossimità del piede dell'argine, o alle condizioni idrauliche globali lungo l'intero percorso di filtrazione. Tra i diversi metodi disponibili, uno dei più consolidati nell'uso è senz'altro quello conosciuto come *blanket theory* (USACE, 2000), con il quale è possibile localizzare il punto di eventuale innesco del processo erosivo. L'approccio, basato su uno schema semplificato a tre componenti (l'argine, il *blanket* a grana fine e il sottostante acquifero), fornisce soluzioni analitiche in forma chiusa per i carichi di pressione h al tetto dell'acquifero, in relazione a diverse configurazioni stratigrafiche. Per i dettagli, si rimanda a USACE (2000). La sezione arginale analizzata in questo studio è stata modellata a partire dalla configurazione del tutto generale di Figura 5 proposta da USACE (2000): in questo caso, il *blanket* è stato assunto semi-impermeabile sia sul lato campagna, sia sul lato fiume, in modo da consentire la filtrazione in direzione verticale, coerentemente con le condizioni di falda riscontrate in sito e già discusse in precedenza. Inoltre, sul lato campagna, il *blanket* è stato simulato come uno strato omogeneo di spessore equivalente z_{bl} , calcolato secondo la procedura indicata in USACE (2000), e permeabilità verticale k_{bl} pari a quella dell'Unità C.

La condizione di innesco del processo di erosione è quindi espressa in termini del fattore di sicurezza al sollevamento, FS_{uplift} , dato da:

4.2 Il metodo di Sellmeijer

La sezione arginale di Boretto è stata inoltre analizzata utilizzando l'approccio teorico di Sellmeijer (Sellmeijer & Koenders, 1991), messo a punto per stimare il carico idraulico ΔH_c che determina la progressione del fenomeno erosivo fino all'alveo del fiume, con conseguente collasso della struttura arginale. Considerando l'equilibrio delle forze agenti sui grani soggetti ad erosione, il metodo esprime ΔH_c in funzione dei contributi F_R , F_S , F_G :

$$\frac{\Delta H_c}{L} = F_R \cdot F_S \cdot F_G \quad (4)$$

$$F_R = \eta \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \tan \theta; \quad F_S = \frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa \cdot L}}; \quad F_G = 0.91 \left(\frac{h_a}{L} \right)^{0.04 + 0.28 / [(h_a/L)^{2.8} - 1]} \quad (5)$$

con L = lunghezza di filtrazione in direzione orizzontale; $\gamma'_p = \gamma_s - \gamma_w$ e γ_s = peso unitario dei soli grani di sabbia; θ = *bedding angle* della sabbia, determinabile sperimentalmente o in funzione della granulometria, mediante correlazioni (Miller & Byrne, 1966); η = coefficiente di White (assunto pari a 0.25); κ = permeabilità intrinseca dell'acquifero; h_a = spessore dell'acquifero.

Per un assegnato carico idraulico ΔH e detto z_t lo spessore del *blanket*, si ritiene soddisfatta la verifica di sicurezza se:

$$\Delta H - 0.3z_t < F_R \cdot F_S \cdot F_G \cdot L \quad (5)$$

Assumendo $\Delta H = 5.6$ m (valore della piena del 2014), e utilizzando i dati di input di Tabella 2, ottenuti dal database sperimentale disponibile o da letteratura (e.g., η) l'Equazione 5 diventa:

$$\Delta H - 0.3z_t = 3.35 < 22.7 = F_R \cdot F_S \cdot F_G \cdot L \quad (6)$$

La verifica di sicurezza risulta pertanto pienamente soddisfatta, escludendo quindi il rischio di collasso arginale per progressione del fenomeno erosivo nell'acquifero, con tale valore di ΔH .

Tabella 2. Parametri adottati nella verifica secondo il metodo di Sellmeijer.

η	θ	γ'_p	d_{70}	κ	L	h_a
-	°	kN/m ³	mm	m ²	m	m
0.25	36.5	16.5	0.15	$1.94 \cdot 10^{-12}$	252	30

5 CONCLUSIONI

Il caso studio di Boretto rappresenta un esempio emblematico della complessità dei fenomeni di erosione retrogressiva per sottofiltrazione e delle sfide associate alla loro mitigazione. Per questo tratto arginale, interessato da ricorrenti e importanti manifestazioni di *piping*, sono state raccolte nel tempo numerose informazioni, provenienti da indagini geotecniche, da monitoraggio piezometrico, da rilievi sulle evidenze superficiali del processo erosivo: assetto stratigrafico del substrato di fondazione e proprietà dei terreni ivi presenti, condizioni di falda, caratteristiche geometriche dei fontanazzi e loro tipo di attività in relazione agli eventi di piena. La disponibilità di queste informazioni risulta cruciale per un'affidabile interpretazione dei meccanismi erosivi e la successiva messa in sicurezza delle strutture arginali.

La memoria riporta i risultati dell'applicazione di due noti metodi di verifica della suscettibilità al *piping*: il metodo noto come "*blanket theory*", mirato all'analisi delle condizioni di innesco del fenomeno, e quello di Sellmeijer, focalizzato sulla progressione del processo erosivo fino al collasso arginale. Sebbene largamente consolidati nell'uso, entrambi i modelli si sono rivelati non completamente soddisfacenti nel descrivere l'attività di erosione rilevata a Boretto, prevedendo ampi margini di sicurezza nei confronti dell'innesco e della progressione non confermati dalle evidenze in sito. La necessità di adottare ipotesi stratigrafiche semplificate, al fine di adattare il reale assetto del substrato di fondazione agli schemi dei modelli interpretativi – soprattutto nel metodo *blanket* – rappresenta sicuramente un fattore di potenziale imprecisione, unitamente alle incertezze legate alla calibrazione di alcuni parametri, non immediatamente determinabili da indagini geotecniche di routine. Nell'analizzare i fenomeni di erosione retrogressiva nel tratto arginale di Boretto, uno degli aspetti più complessi è senz'altro legato alla corretta modellazione

di un volume di terreno pre-eroso, trattandosi di riattivazioni di processi erosivi “cronici”. Appare pertanto auspicabile il ricorso ad approcci numerici che siano in grado di cogliere la complessità stratigrafica del sistema arginale e la natura 3D del fenomeno erosivo, oppure lo sviluppo di database delle evidenze di *piping* che possano contestualmente fungere da strumenti predittivi.

BIBLIOGRAFIA

- AdBPo - Po River Basin Authority, 2005. Progetto strategico per il miglioramento delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta medio-inferiore del Fiume Po. *Technical Report*.
- Bertolini, I., Gottardi, G., Marchi, M., Tonni, L., Bassi, A. & Rosso, A. 2022. Application of CPT to the evaluation of permeability in a Po river embankment prone to backward erosion piping. In Guido Gottardi & Laura Tonni (eds.), *Proc. CPT'22, Bologna, 8-10 giugno 2022*: 300-305. CRC Press.
- García Martínez, M.F., Tonni, L., Marchi, M., Tozzi, S. & Gottardi, G. 2020. A numerical tool for the prediction of sand boil reactivations near river embankments. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 146: 06020023.
- Kelley, J.R., Parkman, K.B., Strange, R.C., Breland, B.R., Dunbar, J.B. & Corcoran, M.K. 2019. *Investigation of Sand Boils near Ware, IL, Middle Mississippi River, Preston Levee District, Report No. ERDC/GSL TR-19-36*. Vicksburg, MS, USA: USACE, Engineer Research and Development Center.
- Miller, R. & Byrne, R. 1966. The angle of repose for a single grain on a fixed rough bed. *Sedimentology* 6: 303–314.
- Robertson, P. K. 2010. Estimating in-situ soil permeability from CPT & CPTu. In *Proc. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'10, Huntington Beach, CA, 9-11 maggio 2010*, Vol. 1.
- Sellmeijer, J. B. & Koenders, M. A. 1991. A mathematical model for piping. *Appl. Math. Modelling* 15: 646-651.
- Semmens, S.N. & Zhou, W. 2019. Evaluation of environmental predictors for sand boil formation: Rhine-Meuse Delta, Netherlands. *Environmental Earth Sciences* 78: 457.
- Tonni, L., Marchi, M., Bassi, A. & Rosso, A. 2024. A sand boil database for piping risk management in the Po River, Italy. *Water* 16: 1384.
- USACE. 2000. *Design and construction of levees, Engineer Manual 1110-2-1913*. Washington DC.
- USACE. 2012. *Mississippi River and Tributaries System. 2011 Post-Flood Report*. Vicksburg, MS.
- Van Beek, V.M. 2015. *Backward Erosion Piping. Initiation and Progression. Doctoral Dissertation*. Delft University of Technology, Delft.
- Vandenboer, K., Van Beek, V. & Bezuijen, A. 2018. 3D character of backward erosion piping. *Géotechnique* 68(1): 86-90.
- Zhou, R., Wen, Z. & Su, H. 2022. Detect submerged piping in river embankment by passive infrared thermography. *Measurement* 202: 111873.

ABSTRACT

GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION AND MONITORING OF RIVER EMBANKMENTS FOR THE ASSESSMENT OF PIPING SUSCEPTIBILITY

Keywords: piping, river embankment, Po river, geotechnical characterization

Sand boils at the toe of the river embankments, i.e. bubbling springs of fluidized sand often accompanied by ejection of soil particles forming a sand volcano around the exit zone, are clear surface indicators of initiation and progression of an internal erosion process known as backward erosion piping. This process, due to excessive underseepage in shallow pervious strata beneath river embankments, may gradually lead to excessive settlement and potential failure of flood protection structures. In Italy, the sand boils so far catalogued along the mid-lower segment of the Po River are approximately 130, though this is most likely an underestimate of the actual number of activations/reactivations occurred in last decades during high water events. As a consequence of such widespread occurrence, geotechnical investigation and monitoring campaigns have been carried out in the most critical river embankment segments, in order to better capture the correlation between sand boil location and local geotechnical conditions. This paper describes in particular the database collected in one of the most well-documented cross-sections (Boretto) and discusses the effectiveness of some well-known analytical approaches to assess piping susceptibility.