Strategie di mitigazione del fenomeno di sifonamento lungo il fiume Po

I. Bertolini, M. Marchi, E. Dodaro, L. Tonni, G. Gottardi
DICAM, Università di Bologna, (Italia)

SOMMARIO: Il meccanismo di collasso arginale per erosione retrogressiva da sottofiltrazione (*Backward Erosion Piping* - BEP) rappresenta una minaccia significativa per le strutture di difesa idraulica caratterizzate da fondazioni di natura granulare, anche confinate superiormente da depositi più fini. Questa configurazione stratigrafica è ampiamente documentata lungo il corso del fiume Po e sotto i suoi argini maestri, dove il fenomeno del sifonamento è stato osservato in oltre 100 sezioni, documentate e censite in un apposito catasto, con frequenti riattivazioni dei cosiddetti "fontanazzi" (*sand boils*) durante le piene di medio-alta intensità. Questa situazione rappresenta una notevole sfida per le autorità incaricate della sicurezza idraulica, costrette spesso ad attuare simultanei interventi di emergenza in diverse sezioni arginali durante il medesimo evento di piena. Il contributo analizza dapprima le diverse tecniche di mitigazione del rischio da BEP, da quelle emergenziali a quelle permanenti, sia tradizionali sia innovative e attualmente oggetto di ricerca e sviluppo; quindi, illustra il caso della sezione arginale di Mazzorno Sinistro (RO), a circa 35 km dalla foce del Po, affetta dalla periodica riattivazione di tre distinti fontanazzi, localizzati a breve distanza e in prossimità di abitazioni private. Tale sezione è stata oggetto di studio mediante l'esecuzione di campagne di indagini e l'installazione di un sistema di monitoraggio attivo dal 2022. Data la vulnerabilità e l'esposizione dell'area, è in corso di realizzazione un importante intervento di mitigazione mediante l'inserimento di diaframmi plastici. Lo studio mira altresì a comparare, tramite modellazione numerica opportunamente calibrata con i dati del monitoraggio, l'efficacia nei riguardi della riduzione del rischio da sifonamento di diverse possibili configurazioni della soluzione di mitigazione individuata.

1 INTRODUZIONE

L' ampio bacino idrografico del fiume Po e la sua vasta pianura alluvionale ospitano un quarto della popolazione nazionale e sono sede di numerose attività agricole e industriali. L'esposizione del territorio a eventi di piena periodici ha reso necessaria, nel corso dei secoli, la costruzione di un complesso e robusto sistema di arginature. In particolare, nei primi 250 km il Po scorre in un alveo naturale privo di difese, ma nei restanti 400 km il fiume è delimitato da un sistema di argini maestri progettati per contenere portate fino a 12.000 m^3/s nelle sezioni medio-inferiori del suo corso (Erbacci et al. 2023). Sebbene le arginature raggiungano oggi dimensioni notevoli, frutto di progressivi interventi di ringrossamento e sopraelevazione, permangono rilevanti criticità in grado di compromettere la loro stabilità. Una delle problematiche più frequenti è sicuramente la formazione dei "fontanazzi" in prossimità degli argini a lato campagna, dovuta al fenomeno del sifonamento negli acquiferi sottostanti, in presenza o meno di uno strato di copertura meno permeabile (*blanket*). Il processo si può innescare o riattivare durante eventi di piena, in corrispondenza di un foro verticale di connessione tra l'acquifero e il piano campagna, per poi propagarsi

per erosione retrogressiva (*Backward Erosion Piping, BEP*) verso la zona di alimentazione del flusso, lungo l'interfaccia tra lo strato granulare e quello più a grana fine soprastante.

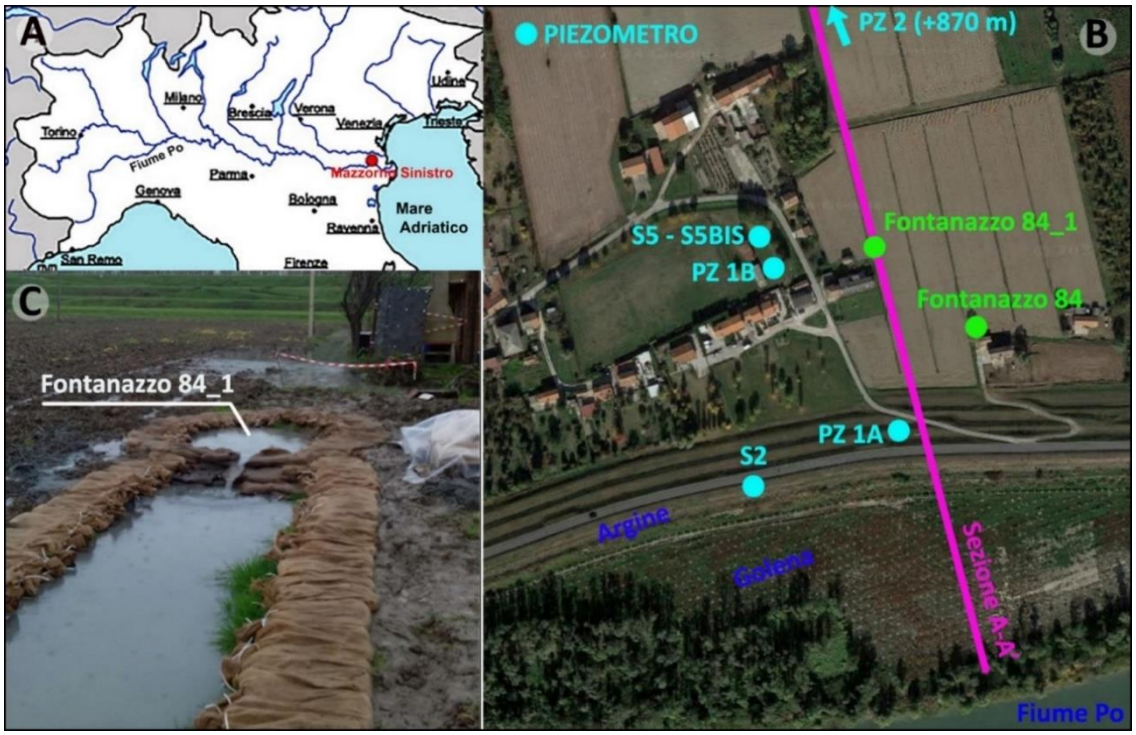

Figura 1. A) Ubicazione di Mazzorno Sinistro (RO), in sponda sinistra del fiume Po. B) Planimetria che riporta la posizione dei due fontanazzi esistenti nella sezione arginale oggetto di studio e dei piezometri installati per il monitoraggio delle falde. C) Fotografia del fontanazzo 84_1 durante la riattivazione di Novembre 2019: si osservi la coronella in sacchi di sabbia eretta in emergenza per rallentare la progressione del fenomeno e la vicinanza del fontanazzo ad un edificio di civile abitazione.

In alternativa, il fenomeno si può manifestare sotto forma di un'area umida lato campagna generata dall'attivazione di famiglie di fontanazzi o dall'annullamento locale della copertura meno permeabile. La formazione di canali di erosione (*pipes)* può condurre fino al totale collasso arginale se il carico idraulico persiste per un tempo sufficientemente lungo, anche a seguito di piene ripetute. In caso di singolo foro verticale di fuoriuscita del flusso, l'avvenuto innesco del fenomeno si manifesta al piano campagna, con la formazione di un fontanazzo (*sand boil*), cioè un vulcano di sabbia generato dalla sedimentazione delle particelle erose che si dispongono a coronella attorno al foro verticale (van Beek et al. 2013).

L'area del Delta del Po è caratterizzata da arginature imponenti, con altezze oltre 10 metri e spessori superiori agli 80 metri, da un letto del fiume spesso pensile rispetto all'area circostante e, pertanto, da una particolare vulnerabilità al fenomeno del BEP, anche con carichi idraulici ordinari (Erbacci et al. 2023). È importante inoltre sottolineare come in tale zona gli eventi di piena possano presentare una durata significativamente maggiore rispetto ai tratti più a monte, dovuta alle condizioni variabili del mare, che possono ostacolare il deflusso delle acque.

Il tratto arginale sinistro del fiume Po localizzato in prossimità dell'abitato di Mazzorno Sinistro nel comune di Adria (RO) è interessato da diffusi fenomeni di erosione interna che si manifestano con affioramenti della falda sotto forma di aree umide insieme alla presenza di diversi fontanazzi storici, alcuni anche di nuova attivazione (Fig. 1 A e B). Il fontanazzo 84_1, in particolare, si è manifestato all'interno di un canale di irrigazione, in prossimità di un edificio di civile abitazione (Fig. 1 C) e risulta ad oggi uno dei più attivi nell'area.

L'area è stata oggetto di una vasta campagna di indagini al fine di investigarne la stratigrafia e stimare i parametri geotecnici rilevanti. Un sistema di monitoraggio piezometrico è stato inoltre implementato al fine di studiare le condizioni idrogeologiche delle unità coinvolte nel fenomeno.

Con le informazioni raccolte è stato altresì progettato, ed è ora in fase di realizzazione, un diaframma plastico (*soil-cement-bentonite cut-off wall*) posizionato al piede dell'argine maestro lato fiume, di profondità 27 m, spessore 60 cm e lunghezza 505 m, che dovrebbe intercettare il moto di filtrazione nell'acquifero sotto la struttura arginale (Erbacci et al. 2023).

L'articolo mira a presentare il modello numerico bidimensionale della sezione, elaborato e calibrato sulla base dei dati raccolti, di sito e di monitoraggio. La soluzione di mitigazione individuata è stata quindi testata mettendo a confronto, in termini di curve di fragilità risultanti, diversi parametri di progetto quali la lunghezza del diaframma, il suo coefficiente di permeabilità e diverse sue possibili ubicazioni lungo la sezione, con l'obiettivo di identificare la configurazione ottimale nei riguardi della mitigazione del fenomeno.

2 STRATEGIE DI MITIGAZIONE DEL SIFONAMENTO

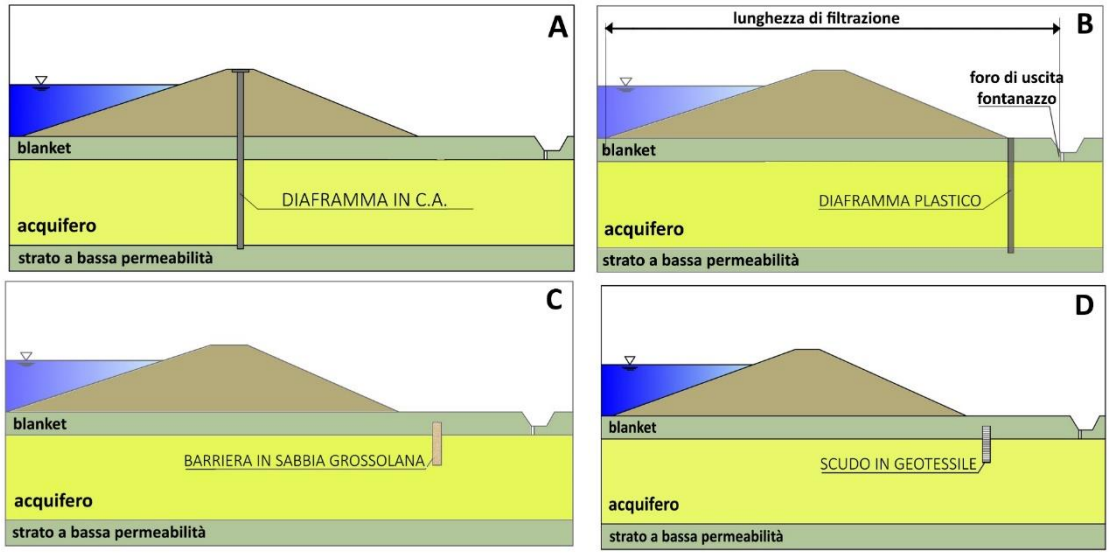

Figura 2. Schemi esemplificativi di alcune possibili misure di mitigazione al sifonamento. (A) diaframma in calcestruzzo armato, (B) diaframma plastico, (C) barriera in sabbia grossolana (D) scudo verticale in geotessile.

Le strategie attuali per ridurre il rischio associato al BEP si suddividono in soluzioni permanenti e soluzioni temporanee. Le soluzioni permanenti consistono in interventi (strutturali o meno) atti a prevenire in modo duraturo la riattivazione e/o la progressione del fenomeno erosivo, mentre quelle temporanee sono soluzioni pensate per fornire una risposta rapida durante gli eventi di piena o in preparazione ad una possibile situazione di emergenza, al fine di ridurre gli effetti dannosi fino alla cessazione dell'emergenza o all'attuazione di interventi permanenti. Un esempio tipico è rappresentato dalla realizzazione di una coronella di sacchi di sabbia attorno al fontanazzo (Fig. 1 C) per ridurre il gradiente idraulico di efflusso attraverso la formazione di un battente d'acqua in uscita dal canale verticale (USACE, 2020). Un'altra possibile soluzione temporanea è rappresentata dall'uso di un filtro pesante posizionato nel foro di uscita del fontanazzo. Tale intervento prevede il collocamento di materiale filtrante nel punto di fuoriuscita, successivamente ricoperto con materiale grossolano drenante, con lo scopo di bloccare il trasporto solido, ma consentendo il passaggio del flusso (Montalvo-Bartolomei & Robbins, 2020).

Le soluzioni permanenti possono essere suddivise in sottogruppi in base alla loro funzione:

- idraulica e strutturale: ad una funzione di controllo idraulico è associata quella di rinforzo strutturale, come ad esempio nel caso di un diaframma in calcestruzzo armato (*concrete cut-off wall*, Fig. 2 A*)* passante longitudinalmente per il corpo arginale.
- idraulica e non strutturale: ad esempio, un diaframma plastico posizionato al piede dell'argine, lato fiume o lato campagna (Fig. 2 B).

Le soluzioni permanenti possono essere inoltre suddivise in base alla modalità con cui intervengono sul fenomeno di BEP:

- agendo sul percorso di filtrazione, bloccandolo o allungandolo e quindi riducendo significativamente i gradienti idraulici di efflusso, mediante il ripristino della continuità del *blanket* lato fiume ovvero la realizzazione di una trincea in materiale a bassa permeabilità (*partial* o *full cut-off trench*) posizionata tra fiume e fontanazzo;
- agendo sulla progressione dei canali di erosione e sulla direzione del loro sviluppo, tramite l'inserimento a monte del fontanazzo di una barriera in materiale granulare (*coarse-sand barrier*) (Akrami et al. 2020; Fig. 2 C) o di uno scudo verticale in geotessile o geocomposito (Forster et al. 2015; Fig. 2 D).

Mentre le soluzioni permanenti di mitigazione che agiscono sui percorsi di filtrazione sono ormai consolidate e ampiamente testate, sia in laboratorio che in sito, quelle che intervengono sulla progressione del BEP sono ancora in una fase di ricerca e sviluppo.
Il diaframma plastico adottato nella sezione arginale di Mazzorno Sinistro fa uso di miscele autoindurenti della tipologia-acqua bentonite-cemento e rientra pertanto nelle soluzioni di mitigazione permanenti non strutturali che agiscono sul percorso di filtrazione, quindi sulla riattivazione del fenomeno e non sulla sua progressione.

3 IL SITO DI STUDIO E IL MODELLO NUMERICO

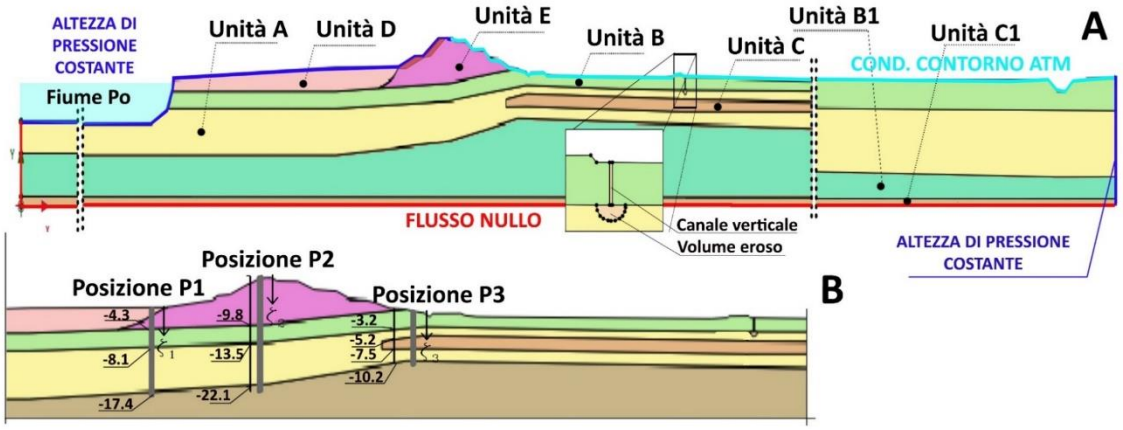

Figura 3. A) Modello stratigrafico lungo la sezione A-A', la cui traccia è indicata in Fig. 1 B, con evidenziate le condizioni al contorno imposte al modello numerico 2D. B) Dettaglio di tre possibili ubicazioni del diaframma: i valori indicati lungo le tre verticali indicano la profondità in metri, rispetto al piano campagna, dei passaggi di strato.

Il tratto arginale di studio è stato oggetto di due campagne di indagini, condotte rispettivamente nel 2020 e nel 2021, nel corso delle quali sono stati eseguiti 9 sondaggi a carotaggio continui e 14 prove penetrometriche statiche con piezocono (Bertolini et al. 2024a). Le indagini hanno coperto una lunghezza arginale di circa 1 km, garantendo una raccolta dati sufficiente per caratterizzare i depositi in prossimità di tutti i fontanazzi storici individuati nell'area. La sezione A–A′ di Figura 3 A mostra la stratigrafia come derivata dai sondaggi disponibili e dall'interpretazione delle prove CPT secondo Robertson (2009). Il processo erosivo da BEP interessa principalmente l'acquifero (Unità A), costituito da un'alternanza di sabbie e sabbie limose, e lo strato più fine superiore (Unità B) composto da miscele limose (Fig. 3 A). In prossimità del fontanazzo, uno strato a natura coesiva di spessore ~2.5 m è interposto all'interno dell'acquifero, riducendone significativamente la sezione e aumentando potenzialmente la velocità locale del flusso.

Un modello bidimensionale agli elementi finiti (FE) è stato sviluppato in Plaxis2D per simulare la filtrazione attraverso la sezione arginale e la dinamica del flusso in prossimità del fontanazzo 84_1. Il modello FE misura 36 metri in altezza e 1,556 metri in lunghezza ed è stato discretizzato

in 21,960 elementi triangolari e 179,573 nodi. La dimensione media degli elementi della *mesh* è pari a 1.7 metri, affinata fino a 0.5 metri nelle Unità A, B e C1 (interessate dal fenomeno del BEP) e fino a 0.02 metri in prossimità del canale verticale del fontanazzo.

Seguendo la metodologia di García Martínez et al. (2020a) e Bertolini et al. (2022), il punto di efflusso del fontanazzo è stato modellato come un tubo verticale cilindrico con una semisfera posizionata alla sua base. Quest'ultima mira a replicare il volume di terreno eroso durante le precedenti riattivazioni ed è caratterizzato da una permeabilità maggiore rispetto a quella dell'acquifero circostante. I dati piezometrici raccolti in prossimità del fontanazzo hanno consentito di calibrare i coefficienti di permeabilità del canale verticale e della semisfera, che sono risultati due volte maggiori (2x) rispetto a quello dell'acquifero (Bertolini et al. 2024b). Il diametro medio del canale verticale è stato assunto pari a 0.2 m, basandosi su osservazioni di campo eseguite in un'altra sezione arginale del Po soggetta a BEP e situata nei pressi di Guarda Ferrarese. A questo valore è stata associata una deviazione standard di 0,1 m per tenere conto dell'incremento di diametro del canale osservato con il ripetersi degli episodi di riattivazione. (Marchi et al., 2021; Garcia Martinez et al., 2020b). Il diametro medio della semisfera, che dipende dal processo erosivo avvenuto nelle precedenti riattivazioni, è stato ipotizzato pari a 2 m.

La Figura 3 A mostra la geometria, la stratigrafia e le condizioni al contorno del modello numerico elaborato. La base del modello ricade in uno strato argilloso profondo (Unità C1), non interessato dalla filtrazione, e per questo associato ad una condizione di flusso nullo. La stessa condizione è imposta anche al confine sinistro del modello, corrispondente alla linea di mezzeria del fiume. Il livello idrometrico del fiume è imposto al modello mediante una successione di 19 scalini di carico idraulico stazionario ed incrementalmente aumentato, da 0 m (alveo del fiume) a 18.7 metri (sommità dell'argine). Questa condizione è applicata all'interfaccia tra il fiume e l'acquifero, la berma e il pendio interno dell'argine. Le condizioni al contorno sul lato destro del modello replicano le osservazioni ottenute da un piezometro installato nell'acquifero a circa 1.1 km dall'argine.

Il gradiente idraulico medio (i_{avg}) nel fontanazzo viene stimato dai risultati della modellazione numerica come il rapporto tra la perdita di carico piezometrico tra le due estremità del canale verticale e la sua lunghezza (2,68 m). Il gradiente idraulico critico di riattivazione è invece definito come il gradiente che provoca il sollevamento delle particelle di sabbia all'interno del canale verticale che si verifica quando le forze di trascinamento eguagliano il peso sommerso delle particelle stesse ed è risultato pari a 0,969 per la sezione in esame. Nelle analisi numeriche il canale di irrigazione dove si sviluppa il fontanazzo 84_1 è stato considerato vuoto.

A partire dai risultati della modellazione numerica, applicando la tecnica di analisi probabilistica del First-Order-Second-Moment (FOSM), sono state generate le curve di fragilità che esprimono la probabilità di riattivazione del fenomeno (cioè, la probabilità che $i_{avg} > i_{crit}$) in funzione del carico idraulico. In particolare, sono state selezionate sei variabili probabilistiche: il coefficiente di permeabilità delle unità A, B e C (k_A, k_B, k_C), il diametro del canale verticale del fontanazzo (d_{pipe}), il diametro della semisfera (d_{sphere}) e il coefficiente di permeabilità del canale verticale e della semisfera (k_{exit}). La Tabella 1 riporta, in termini di valore medio e deviazione standard, le variabili probabilistiche adottate nel modello numerico. I valori di permeabilità (k_A, k_B, k_C) sono stati stimati dai profili di *logk* applicando le ben note relazioni empiriche di Robertson & Cabal (2010) in funzione dell'Indice di comportamento del materiale (I_c) e sono risultati ben interpolabili da funzioni gaussiane. Tali valori sono stati quindi comparati ai valori ottenuti da prove Lefranc sui terreni dell'Unità A, da prove di dissipazione nei terreni fini (Unità B, C e B1) e da prove di permeabilità in cella triassiale su campioni indisturbati (Unità A e C).

Tabella 1. Valori medi (μ) e deviazioni standard (SD), tra parentesi quadre, dei parametri del modello. μ e SD associati a k_A, k_B, e k_C derivano dall'analisi esclusiva delle prove CPT lungo la sezione AA'.

Variabili Probabilistiche	**Media [Deviazione Standard]**
k_A	3.19E-05 m/s [3.99 E-07]
k_B	4.69E-09 m/s [3.21E-09]
k_C	7.86E-10 m/s [8.11E-10]
k_{exit}	6.38E-05 m/s [3.19E-05]
d_{pipe}	0.2 m [0.1]
d_{sphere}	2 m [2]

4 RISULTATI E DISCUSSIONE

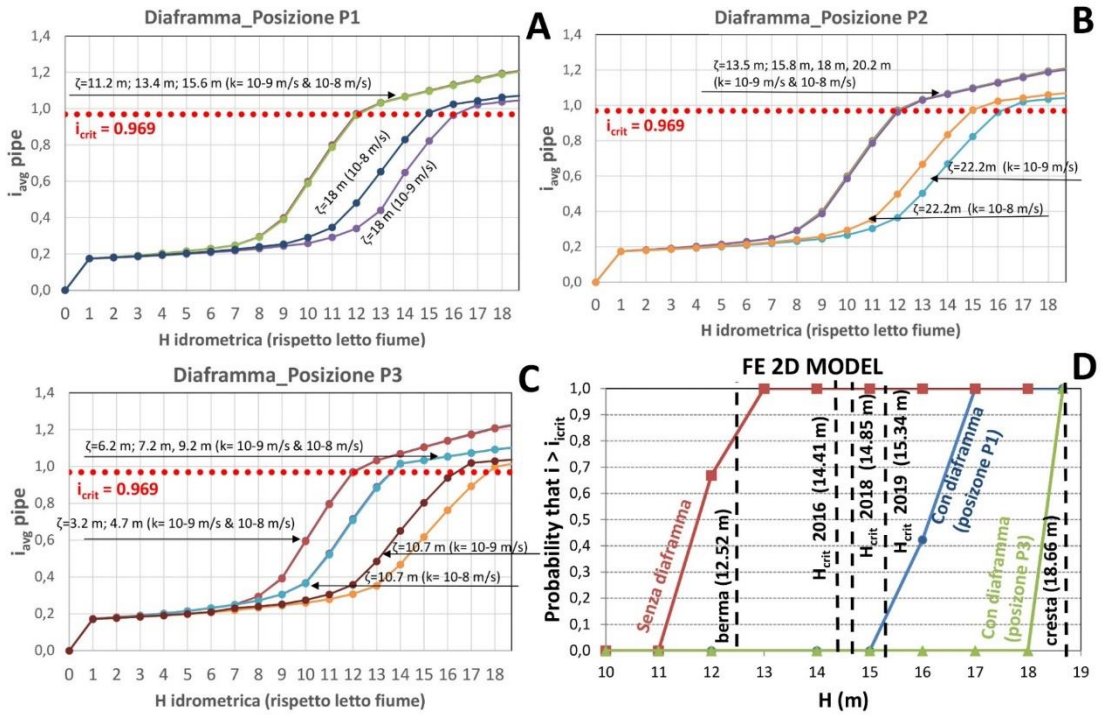

Figura 4. A, B e C) Andamento del gradiente idraulico medio nel canale verticale del fontanazzo in funzione dell'altezza idrometrica nelle configurazioni del diaframma in posizione P1, P2 e P3, rispettivamente (cfr. Fig. 3 A) e con permeabilità del diaframma pari a 10E-9 e 10E-8 m/s. D) Curve di fragilità relative alla configurazione senza diaframma e con diaframma in posizione P1 e P3.

La Figura 4 riporta l'andamento del gradiente medio nel canale verticale del fontanazzo con l'altezza idrometrica, in funzione della posizione del diaframma (posizione P1, P2 e P3, Fig. 3 B), della permeabilità della barriera e della sua profondità rispetto al locale piano campagna, quest'ultima descritta dalla grandezza ζ. È possibile osservare che:

- il profilo di i_{avg} non varia con la profondità dell'opera fino a che questa non interessa l'intera profondità dell'acquifero (Fig. 4 A e B);
- il profilo di i_{avg} rimane invariato sia con il diaframma in posizione P1 che in posizione P2. Tuttavia, i_{avg} diminuisce, a parità di altezza idrometrica, nella configurazione P3, in prossimità del fontanazzo (Fig. 4 A, B e C rispettivamente per ζ = 18, 22.2 e 10.7 m);
- l'aumento del coefficiente di permeabilità del diaframma di un ordine di grandezza (da 1E-9 m/s a 1E-08 m/s) non produce alcun cambiamento nel profilo di i_{avg} fintanto che questo non risulta completamente penetrante la fondazione in materiale sabbioso. In quest'ultimo caso, una crescita del coefficiente di permeabilità corrisponde ad un aumento del gradiente (comparare in Fig. 4 A, B e C i corrispondenti profili ottenuti per i due diversi valori di permeabilità);
- la realizzazione dell'opera in posizione P3 penetrante l'acquifero fino a raggiungere l'unità C, contribuisce solo limitatamente a ridurre il gradiente medio nel canale verticale (comparare in Fig. 4 C le curve per ζ = 3.2 m e 6.2 m). Una diminuzione significativa si ottiene invece con una barriera che si sviluppa sull'intera profondità dell'acquifero (curva ζ = 10.7 m in Fig. 4 C).

A partire dai risultati preliminari ottenuti dall'osservazione delle curve di i_{avg} con l'altezza idrometrica in Fig. 4 A, B e C, è possibile selezionare le due configurazioni più significative sulle quali elaborare le curve di fragilità della sezione. Le configurazioni per ζ = 18 m e 10.7 m in posizione P1 e P3, rispettivamente, e con permeabilità pari a 10E-9 m/s, sono state individuate poiché garantiscono il maggiore vantaggio in termini di prestazioni-economicità, riducendo sensibilmente i gradienti di uscita e richiedendo una minore profondità della barriera, rispetto alla

stessa in posizione P2. Quest'ultima risulterebbe vantaggiosa nel caso in cui fosse necessario intervenire non solamente su fenomeni di erosione interna nel terreno di fondazione ma anche all'interno del corpo arginale stesso, limitando al contempo la progressione del fronte di saturazione.

La Figura 4 D presenta le curve di fragilità relative alla configurazione della sezione arginale prima dell'intervento ("senza diaframma") e dopo l'intervento, con diaframma nella posizione P1 (al piede dell'argine lato fiume, in blu) e posizione P3 (al piede dell'argine lato campagna, in verde). Dall'analisi si evince che, nella configurazione pre-intervento, la sezione arginale raggiunge una probabilità di riattivazione del BEP del 100% per livelli idrometrici appena superiori all'altezza della berma. Al contrario, entrambe le soluzioni di mitigazione adottate garantiscono probabilità di riattivazione significativamente ridotte, inferiori al 12%, per i livelli idrometrici associati agli episodi di riattivazione verificatisi negli anni 2016, 2018 e 2019, evidenziando un'elevata efficacia nella mitigazione del rischio associato. Tra le configurazioni analizzate, il posizionamento del diaframma al piede dell'argine lato campagna sembra offrire le migliori prestazioni.

5 CONCLUSIONI

L'articolo presenta i risultati di una serie di analisi numeriche 2D che simulano la filtrazione associata al fenomeno del *Backward Erosion Piping* (BEP) in una sezione di argine fluviale situata presso Mazzorno Sinistro (RO), lungo il fiume Po. Questa è stata soggetta a numerose passate riattivazioni di fontanazzi storici, molti dei quali si sono sviluppati in prossimità di civili abitazioni. Al fine di ridurre il rischio da BEP, è attualmente in fase di realizzazione una soluzione di mitigazione mediante diaframma plastico. Lo studio mostra i risultati di diverse possibili posizioni dell'opera, in termini di gradiente idraulico medio nel canale verticale in funzione dell'altezza idrometrica, per uno dei fontanazzi storici più attivi nell'area (fontanazzo 84_1). Sono stati altresì indagati diversi coefficienti di permeabilità e profondità del diaframma. La stratigrafia del terreno, il suo profilo altimetrico, così come le proprietà fisiche, meccaniche e idrauliche delle unità di interesse, sono state ricavate da indagini in sito e prove di laboratorio. Dalle analisi è emerso che le profondità del diaframma che penetrano l'intero spessore dell'acquifero, insieme alla scelta di un materiale a bassa permeabilità (dell'ordine di 10E-9 m/s), garantiscono la migliore mitigazione del rischio associato. I risultati ottenuti dalle configurazioni ottimali con posizionamento al piede arginale lato fiume e lato campagna sono stati successivamente rappresentati in termini di curve di fragilità, che restituiscono la probabilità di innesco del BEP in funzione di carichi idraulici crescenti. Il FOSM è stato impiegato per trattare l'incertezza dei parametri principali che influenzano la risposta nei riguardi del fenomeno. I risultati sono stati infine discussi alla luce delle riattivazioni osservate durante diversi eventi reali di piena.

RINGRAZIAMENTI

The activities presented in this paper were carried out within the RETURN Extended Partnership and received funding from the EuropeanUnion Next-GenerationEU (National Recovery and Resilience Plan – NRRP, Mission 4, Component 2, Investment 1.3 – D.D. 1243 2/8/2022, PE0000005 - Spoke TS2).

BIBLIOGRAFIA

Akrami, S., Bezuijen A., van Beek, V., Rosenbrand, E., Terwindt, J., Forster, U. 2021. Analysis of development and depth of backward erosion pipes in the presence of a coarse sand barrier. *Acta Geotechnica* 16: 381-397. DOI https://doi.org/10.1007/s11440-020-01053-0

Bertolini, I. 2024a. Field data based numerical analysis of sand boil reactivation along river embankments. In Pesevski (ed.), *28th European Young Engineers Conference - EYGEC 2024*, Demir Kapija, Macedonia, 25-29 Giugno. ISBN 978-608-4510-61-6.

Bertolini, I., Gottardi, G., Marchi, M., Tonni, L. 2022. Probability of reactivation of a sand boil near a river embankment of the Po River (Italy). In *Proceedings of the 8th International Symposium for Geotechnical Safety & Risk*, Newcastle, Australia, 14-16 December. http://dx.doi.org/10.3850/978-981-18-5182-7_00-16-004.xml

Bertolini, I., Marchi, M., Tonni, L. Gottardi, G. 2024b. Reliability analysis of a Po River embankment affected by underseepage. In Proceedings XVIII European Conference on soil mechanics and geotechnical engineering, *Geotechnical engineering challenges to meet current and emerging needs of society*.

Lisbon, Portugal, 26-30 Agosto. ISBN 978-1-032-54816-6

Erbacci, P., Bergamaschi, S., Bauce, R., Gobbi, A. et al. 2023. Relazione Generale- Relazione "DNSH"- Relazione "CAM", perizia n°1605. Argine Sinistro Fiume Po di Venezia, abitato di Mazzorno Sinistro, lavori di sistemazione argine - 1° stralcio. Progetto esecutivo.

Forster, U., Bezuijen, A., Van Den Berg, S.G. 2015. Vertically inserted geotextile used for strengthening levees against internal erosion. In Winter, Smith, Eldred & Toll (eds), *Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*, 13-17 September, Edinburgh, Scotland. ISBN: 978-0-7277-6067-8

García Martínez, M.F., Gottardi, G., Marchi, M., Tonni, L. 2020b. On the Reactivation of Sand Boils Near the Po River Major Embankments. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 40: 328- 337. ISSN2366-2565. https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002380

García Martínez, M.F., Tonni, L., Marchi, M., Tozzi, S. and Gottardi, G. 2020a. Numerical tool for prediction of sand boil reactivations near river embankments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 146(12). https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002380

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* 54(4). https://doi.org/10.1144/qjegh2020-097.

Montalvo-Bartolomei, A.M., Robbins, B.A. 2019. Laboratory Evaluation of Lightweight Sand Boil Filters. *Proceedings of the 2019 Dam Safety National Conference*, 8-12 September, Orlando, Florida.

Robertson, P.K. 2009. Interpretation of cone penetration test-a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal* 46(11):1337-1355. http://dx.doi.org/10.1139/T09-065

Robertson, P.K., Cabal K.L. 2010. *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*, 4th edition.

USACE. 2020. *Flood emergency handbook*. United States Army Corps of Engineers (USACE) – Albuquerque District. Albuquerque, NM.

Van Beek, V. 2013. Backward Erosion Piping. In Bonelli & Nicot (eds), *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees:* chapter 3, 193-269. John Wiley & Sons. DOI:10.1002/9781118577165.

ABSTRACT

STRATEGIES FOR PIPING MITIGATION ALONG THE PO RIVER

Keywords: river embankment, internal erosion, sand boil, risk mitigation, plastic diaphragm

The river embankment failure caused by Backward Erosion Piping (BEP) represents a significant threat to hydraulic defense structures resting over sandy foundations, possibly overlaid by a finer material. Such stratigraphic configuration is widely documented along the Po river and beneath its major embankments, where piping phenomena have been observed in over 100 sections, with frequent reactivations of "sand boils" during medium and high water level events. This situation poses a substantial challenge to the local authorities responsible for the hydraulic safety, often requiring simultaneous emergency interventions across multiple embankment sections during the same event. This study first analyses various BEP risk mitigation techniques, ranging from temporary emergency measures to permanent solutions, using both traditional approaches and innovative strategies currently under research and development. Subsequently, it focuses on the case of the embankment section in Mazzorno Sinistro (RO), approximately 35 km from the mouth of the Po river, that is affected by the periodic reactivation of three distinct sand boils located at short distance near private residences. This section has been investigated through field campaigns and the installation of an extensive monitoring system, active since 2022. Given the vulnerability and exposure of the area, a major mitigation intervention involving the installation of a plastic diaphragm is currently underway. The study aims to compare, through purposely calibrated numerical modelling, the effectiveness of different configurations of such mitigation solution in reducing the flood risk associated with piping.