

## CALIBRAZIONE MEDIANTE ANALISI INVERSA DEI PARAMETRI IDRAULICI E DI RITENZIONE DI UN RILEVATO ARGINALE SOGGETTO AD EROSIONE RETROGRESSIVA PER SOTTOFILTRAZIONE

Ilaria Bertolini

*Università di Bologna, Scuola di Ingegneria, DICAM*

[ilaria.bertolini3@unibo.it](mailto:ilaria.bertolini3@unibo.it)

Michela Marchi

*Università di Bologna, Scuola di Ingegneria, DICAM*

[michela.marchi@unibo.it](mailto:michela.marchi@unibo.it)

Laura Tonni

*Università di Bologna, Scuola di Ingegneria, DICAM*

[laura.tonni@unibo.it](mailto:laura.tonni@unibo.it)

Guido Gottardi

*Università di Bologna, Scuola di Ingegneria, DICAM*

[guido.gottardi2@unibo.it](mailto:guido.gottardi2@unibo.it)

### Sommario

Il contributo descrive una strategia per la modellazione numerica bidimensionale del moto di filtrazione in regime transitorio che si sviluppa in una sezione arginale del fiume Po, al variare del livello idrometrico del fiume. La sezione di indagine, che si trova in località Guarda Ferrarese (FE), è sede di un ‘fontanazzo’ (*sand boil*) storico, che si riattiva in concomitanza di eventi di piena anche di media intensità.

Il codice utilizzato per le analisi è il software commerciale Hydrus 2D di Pc-Progress, che è stato utilizzato per condurre dapprima le simulazioni dirette, quindi quelle indirette (*Inverse Analysis*) al fine di ottimizzare i parametri idraulici e di ritenzione del modello numerico elaborato. Durante una recente campagna di indagine geotecnica sono state svolte prove in sito e installati piezometri tipo Casagrande per il monitoraggio della falda superficiale e del primo acquifero. Le informazioni raccolte sono state utilizzate per individuare il *range* di variazione dei parametri, al fine dell’ottimizzazione degli stessi, e per condurre le simulazioni indirette. Il contributo costituisce un primo step di analisi, fondamentale per calibrare i modelli di filtrazione della sezione di studio. Questo tipo di analisi contribuisce a migliorare la metodologia di analisi del fenomeno di erosione retrogressiva (*Backward erosion piping*), problematica che mette a rischio la stabilità di numerose sezioni arginali del bacino idrografico del fiume Po, in vista dell’elaborazione di avanzati modelli numerici che non solo siano descrittivi dei fenomeni osservati ma anche predittivi nel medio-lungo periodo.

### 1. Introduzione

Il fiume Po, con una lunghezza di 652 km, risulta il maggiore fiume italiano sia come massima portata alla foce che come estensione del suo bacino idrografico. Metà della lunghezza del suo corso è salvaguardata da argini maestri, la cui stabilità e piena funzionalità è di importanza vitale per tutte quelle attività umane e commerciali che nel tempo sono nate e prosperate sulle sponde di questo grande fiume. Tra le modalità di collasso arginale, quella per erosione retrogressiva (*Backward erosion piping-BEP*) è una delle più temute. Il fenomeno infatti è stato registrato su circa 130 sezioni arginali del fiume Po, che hanno mostrato riattivazioni storiche ripetute nel corso dei numerosi eventi di piena periodici del fiume (Marchi et al, 2022). I fattori predisponenti il fenomeno sono sia di tipo stratigrafico che idraulico. Infatti, affinché il fenomeno possa svilupparsi il sottosuolo deve essere

costituito da un tetto impermeabile (*blanket*) sovrastato da un acquifero di elevata permeabilità. Gli aspetti idraulici riguardano invece la possibilità che si sviluppino gradienti idraulici elevati, normalmente generati dalla differenza di carico tra monte e valle del rilevato arginale. All’innescò del fenomeno si osserva il sollevamento e/o la spaccatura del *blanket*, contestualmente alla fluidificazione del terreno sabbioso in corrispondenza del foro di uscita, a seguito dell’annullamento delle tensioni efficaci. All’aumentare della velocità del flusso in uscita i grani di sabbia vengono trasportati in superficie, formando il caratteristico vulcano di sabbia, chiamato “fontanazzo”. La progressione del fenomeno è caratterizzata dalla formazione di *pipes* all’interfaccia tra acquifero e *blanket*, che possono retrocedere fino a sfociare nella zona di alimentazione del flusso, per poi allargarsi fino a portare al collasso l’argine sovrastante (Bonelli, 2013).

## 2. Il caso studio

La sezione arginale del fiume Po, oggetto del caso di studio, si trova nei pressi di Guarda Ferrarese (FE). Tale sezione è soggetta periodicamente a riattivazioni di un fontanazzo naturale che, in alcune occasioni ha creato un vulcano di sabbia con diametro esterno di circa 3 m (Marchi et al, 2021). Il profilo altimetrico della sezione è stato rilevato mediante opportuna campagna topografica, mentre la stratigrafia della sezione mediante esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo e prove CPTu, i cui risultati sono stati elaborati con la ben nota classifica di Roberston (2009). La stratigrafia così ottenuta è presentata in Fig.1. Piezometri tipo Casagrande sono stati installati in cresta al rilevato (PZ4) e sul primo gradone della scarpata lato campagna (PZ3) per monitorare l’andamento delle pressioni nel primo acquifero confinato (Unità A), mentre ulteriori due piezometri sono stati installati a circa ~300 m di distanza dalla sezione per il monitoraggio delle condizioni al contorno relative alla falda freatica che interessa le unità B e C soprastanti l’acquifero (PZ2) e relative al primo acquifero (PZ5). Il coefficiente di permeabilità saturata dei terreni investigati ed il suo range di variazione è stato stimato da prove CPTu alle quali sono state applicate le correlazioni empiriche di Roberston (2010). I risultati sono stati quindi comparati con quelli ottenuti da prove in foro tipo Lefranc e dissipazioni eseguite nei depositi fini (unità B e C), mostrando un accordo più che soddisfacente (Bertolini et al, 2022a). In Tab.1 viene proposto un riepilogo dei valori medi e delle deviazioni standard da CPTU dei coefficienti di permeabilità  $k_s$  delle diverse unità stratigrafiche (Bertolini et al, 2022b).

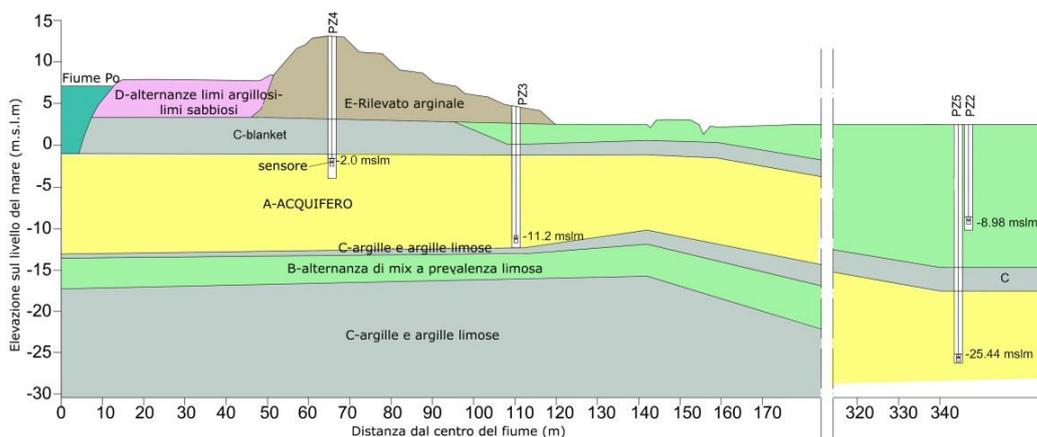


Figura 1: Sezione stratigrafica della sezione arginale nei pressi di Guarda Ferrarese con indicazione del posizionamento dei piezometri tipo Casagrande e della profondità dei sensori negli stessi (in m s.l.m.)

## 3. Il modello numerico

Hydrus 2D di Pc-Progress (Simunek et al, 2006) è un software commerciale di calcolo FE di ampia applicazione per la simulazione numerica di moti di filtrazione stazionari o transitori in mezzi porosi

saturo o parzialmente saturo. Quando i parametri del modello, le condizioni iniziali e quelle al contorno sono note, il programma risolve in modo diretto il problema usando un approccio agli Elementi Finiti nello spazio e alle Differenze Finite nel tempo. Esso inoltre è in grado di eseguire l'ottimizzazione di uno o più parametri del modello mediante un metodo locale basato sull'algoritmo di Levenberg – Marquardt. La stima indiretta di tali parametri è ottenuta dalla minimizzazione di una funzione obiettivo partendo da un set di parametri iniziali e da un database di punti di osservazione ottenuti dal monitoraggio in sito. In Figura 2 sono rappresentati il modello geometrico della sezione in esame ricreato nel software di calcolo Hydrus 2D (dimensioni del dominio 346\*61 m) e le condizioni al contorno imposte. Al confine tra il fiume e l'area golenale è imposta una condizione al contorno di tipo Dirichelet, l'altezza idrometrica nel tempo rilevata dall'idrometro installato a Polesella (Lat. 44.958333, Long. 11.756388). Il confine inferiore presenta una condizione di flusso nullo, mentre quello destro, rappresentante le condizioni al contorno lontane dalla sezione arginale, presenta due condizioni diverse: i valori di PZ2 sono imposti per rappresentare l'andamento nel tempo della falda freatica mentre quelli di PZ5 per rappresentare quelli del primo acquifero (Unità A). Il confine superiore è di tipo atmosferico, il contributo evapotraspirativo è trascurato mentre il contributo pluviometrico è considerato e i suoi dati ricavati da una centralina meteorologica installata a Copparo (FE), a 11 km dalla sezione in esame. La *mesh* scelta non è strutturata ed è a base triangolare, con dimensione 1m e raffinata fino a una dimensione di 0,1m in corrispondenza del canale di uscita e dei punti di osservazione. La *mesh* risultante è composta da 5470 nodi, 1126 elementi 1D e 10688 elementi 2D.

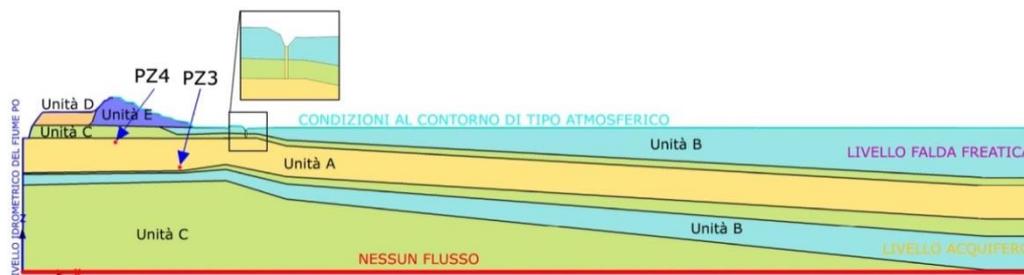


Figura 2: Geometria della sezione in esame con indicazione della stratigrafia, delle diverse condizioni al contorno applicate e dei punti di osservazione considerati (PZ4 e PZ3) in corrispondenza dei piezometri installati in sito. Il canale di uscita in corrispondenza del "fontanazzo" è stato schematizzato come un canale di diametro 0,225m riempito di materiale sabbioso proveniente dall'Unità A.

Il periodo simulato è di 302 giorni (19/7/21-17/5/22). I valori medi da CPTu del coefficiente di permeabilità satura  $k_s$  delle unità A, B e C (sintetizzati in Tab.1) sono assunti come parametri iniziali. I valori ricavati allo stesso modo per le unità D ed E sono affetti da un elevato grado di incertezza generata dalle condizioni di parziale saturazione di questi terreni. A questa si associa la significativa eterogeneità spaziale osservata in particolare per il corpo arginale. E' comunque rilevante sottolineare che il fenomeno di sottofiltrazione modellato interessa solamente le unità A, B, e C nel periodo in analisi, caratterizzato da carichi idraulici che si mantengono costantemente al di sotto della zona golenale. I parametri della curva di ritenzione sono invece stimati indirettamente mediante funzioni di pedo-trasferimento implementate in Hydrus 2D (modello ROSETTA elaborato da Schaap et al. 2001) sulla base della distribuzione granulometrica media dei terreni e del peso specifico delle particelle solide. Informazioni dettagliate riguardanti la caratterizzazione fisica dei terreni in esame è riportata in Bertolini et al. (2022a). In Tab.1 sono presentati i parametri di ritenzione del ben noto modello van Genuchten - Mualem.  $\theta_s$  e  $\theta_r$  rappresentano il contenuto umido alla saturazione e quello residuo, rispettivamente;  $\alpha$  rappresenta il punto di inflessione della curva di ritenzione che individua il valore di suzione che corrisponde al primo ingresso di aria nei pori,  $n$  è un parametro di *fitting* che definisce la pendenza della curva ed è correlato alla distribuzione della dimensione dei pori nel terreno, mentre  $l$  è il parametro di tortuosità della funzione di conducibilità idraulica.

Tabella 1: Valore medio e deviazione standard (D.S.) del coefficiente di permeabilità satura  $k_s$  da CPTu delle Unità A,B,C e i parametri della curva di ritenzione relativi al modello van Genuchten-Mualem stimati mediante funzioni di pedo-trasferimento.

	$k_s$ media (m/s)	$k_s$ D.S.(m/s)	$\theta_s$ (%/%)	$\theta_r$ (%/%)	$\alpha$ (1/m)	$n$ (-)	$l$ (-)
Unità A	1,456E-05	1,170E-05	0,26	0,046	3,6	1,88	0,5
Unità B	5,352E-06	1,043E-06	0,27	0,039	2,4	1,21	0,5
Unità C	2,391E-08	4,657E-09	0,26	0,028	4,6	1,19	0,5

#### 4. Analisi di sensitività dei parametri del modello

Un'analisi di sensitività preliminare è stata svolta con la tecnica OFAT (One-Factor-A-Time). Tale tecnica è spesso utilizzata per studiare la sensitività di un sistema di  $k$  parametri: il valore di un parametro viene variato di +/-1% mentre i rimanenti  $k-1$  parametri sono lasciati al loro valore iniziale. Viene quindi definito un Coefficiente di Sensitività ( $S(t,b_j)$ ) come segue (eq.1):

$$S(t,b_j) = \frac{|Y(b_j + \Delta b_j e_j) - Y(b_j)|}{Y(b_j)} \quad (1)$$

Dove  $S(t,b_j)$  è il cambiamento nella variabile  $Y$  (per esempio contenuto umido o altezza di pressione) dovuta al cambiamento dell'1% nel valore del parametro  $b_j$  al tempo  $t$ ;  $\Delta b_j = 0,01 b_j$ ,  $e_j$  è il  $j$ -esimo vettore unità,  $j=1..k$ . Questa tecnica è ampiamente usata in molti campi della modellazione numerica FE per la sua semplicità di applicazione e il ridotto sforzo computazionale richiesto, mentre il suo limite principale risiede nell'incapacità di valutare l'influenza sull'*output* del modello di parametri correlati. La tecnica OFAT è stata applicata nei punti di osservazione PZ3 e PZ4 ai parametri idraulici e di ritenzione delle unità A,B,C, interessate primariamente dal moto di filtrazione e dal fenomeno del sifonamento per erosione retrogressiva. L'analisi ha rilevato:

- una sensitività nulla di tutti i parametri idraulici e di ritenzione dell'Unità A, ad esclusione del suo coefficiente di permeabilità satura (massimo valore del Coefficiente di Sensitività pari 0,0018).
- una sensitività significativa ( $>0,0005$ ) del coefficiente di permeabilità satura e del parametro  $\theta_s$  dell'Unità B (massimo valore del Coefficiente di Sensitività pari a 0,001 e 0,0006, rispettivamente).
- una sensitività significativa ( $>0,0005$ ) del coefficiente di permeabilità satura e del parametro  $n$  dell'Unità C (massimo valore del Coefficiente di Sensitività pari a 0,001 e 0,0007, rispettivamente).

In Fig.3 viene riportato l'andamento nel tempo dei parametri che hanno mostrato maggiore sensitività nel punto di osservazione PZ3. Il processo di ottimizzazione successivo per *Inverse Analysis* si concentrerà sui parametri individuati in questa analisi preliminare.

#### 5. Ottimizzazione dei parametri per *Inverse Analysis*

Il processo di calibrazione dei parametri sensibili del modello ha come scopo ultimo quello di individuare il *set* di parametri che minimizza le differenze tra dati osservati e dati simulati in uno o più punti rilevanti del dominio. Esso storicamente si avvale di una procedura empirica, basata sulla modifica dei parametri per "tentativi ed errori", un processo molto oneroso in termini di tempo e molto legato all'abilità (e pazienza) del modellatore, soprattutto quando il modello risulta multiparametrico (Bertolini, 2021). Poiché il problema affrontato richiede la calibrazione di ben 5 parametri del modello ( $k_s$  delle Unità A, B e C, dei parametri di ritenzione  $n$  di C e  $\theta_s$  di B), è stata scelta una ottimizzazione di tipo indiretto mediante *Inverse Analysis*. Il *set* di parametri iniziali è analogo a quello utilizzato nelle simulazioni dirette del problema mentre il database di punti di osservazione è composto dalle misure di altezza di pressione (in m) fornite dai piezometri PZ3 e PZ4 nel tempo.

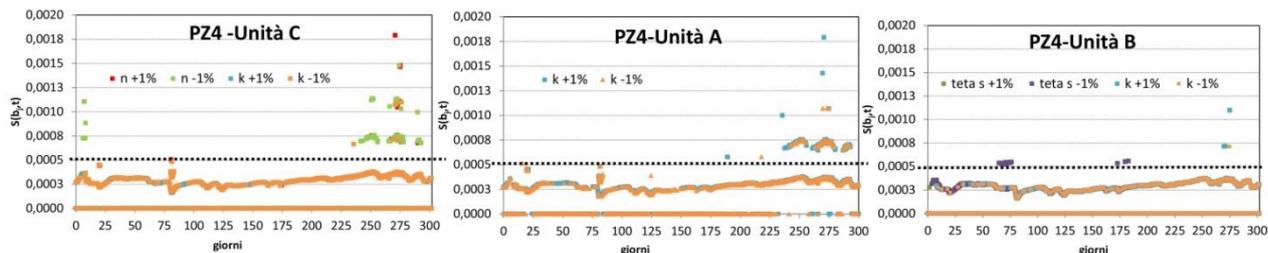


Figura 3: La figura mostra l'andamento nel tempo del Coefficiente di Sensitività relativo ai parametri la cui variazione ha mostrato maggiore incidenza sull'output del modello nel punto di osservazione PZ4.

Come primo tentativo, i parametri sono stati lasciati liberi di variare senza alcun vincolo, si è però osservato che i valori ottimizzati dei coefficienti di permeabilità viravano verso valori non realistici. In alcuni casi, infatti, è stato ottenuto un valore  $k_s$  dell'Unità B maggiore di quello dell'Unità A, mentre, in altri casi, si sono ottenuti valori di  $k_s$  dell'Unità B ed A tipici di una sabbia pulita e di una ghiaia, rispettivamente. Il campo di variazione dei parametri  $k_s$  è stato quindi limitato all'intervallo [media-D.S.; media+ D.S.] in accordo con i dati ottenuti da CPTu, mentre i rimanenti parametri di ritenzione sono stati lasciati liberi di variare nel campo dei valori possibili.

Sono state eseguite 3 simulazioni indirette:

- la prima con lo scopo di ottimizzare solamente i parametri  $k_s$  delle 3 Unità A, B e C.
- la seconda con lo scopo di ottimizzare tutti e 5 i parametri simultaneamente.
- la terza con lo scopo di ottimizzare solo i parametri che hanno mostrato una sensibilità rilevante in un numero maggiore di istanti temporali ( $k_s$  dell'Unità A ed i parametri di ritenzione  $n$  di C e  $\theta_s$  di B).

In Tab.2 sono riportati i parametri ottimizzati ottenuti per *Inverse Analysis* nei 3 casi presentati.

Tabella 2: Valori ottenuti dalla procedura di ottimizzazione nelle 3 simulazioni indirette eseguite per la calibrazione del modello numerico in esame.

	$k_{s\_A}$ (m/s)	$k_{s\_B}$ (m/s)	$k_{s\_C}$ (m/s)	$\theta_{s\_B}$ (%/%)	$n\_C$ (-)
<b>Simulazione 1</b>	2,626E-05	6,395E-06	1,925E-08	0,271	1,173
<b>Simulazione 2</b>	2,626E-05	6,395E-06	1,925E-08	0,100	1,076
<b>Simulazione 3</b>	2,626E-05	5,352E-06	2,390E-08	0,100	1,101

Al fine di individuare tra le simulazioni indirette eseguite, il *set* di parametri che meglio rappresenta i dati osservati nei punti PZ3 e PZ4 del dominio, si è optato per un confronto qualitativo/grafico in termini di dato simulato (altezza di colonna d'acqua) nel tempo. La simulazione 2 risulta, tra le tre sopra citate, quella che meglio rappresenta i dati osservati e la sua *performance* in funzione del tempo è presentata in Figura 4 (punti rossi) e messa a confronto con la simulazione base che utilizza il *set* di parametri iniziali (punti verdi) e con i dati osservati (punti arancioni). Le simulazioni risultano coincidenti in PZ4, mentre un miglioramento è apprezzabile in PZ3 tra simulazione base e la simulazione ottimizzata. In Figura 4 è anche riportata la *performance* nel tempo di una simulazione indiretta (punti viola), che ottimizza la permeabilità satura di A e C senza aver posto alcun limite alla loro variazione. Sebbene essa simuli meglio il comportamento osservato in sito in PZ3 (vedere periodo temporale 225-300 giorni), la permeabilità satura di A pari a  $1,66 \cdot 10^{-4}$  m/s, caratteristica di una sabbia grossolana, risulta troppo alta rispetto alle evidenze sperimentali.

Da questo l'importanza di avere una attendibile distribuzione probabilistica dei parametri oggetto di ottimizzazione da prove in sito e/o di laboratorio che guidi il processo di *Inverse Analysis*.

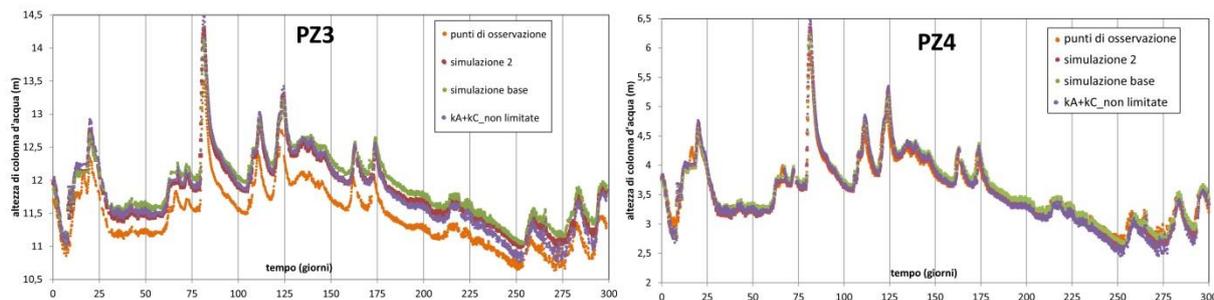


Figura 4: Confronto tra le performances della simulazione 2 e la simulazione base rispetto ai dati osservati in PZ3 e PZ4.

## 6. Conclusioni

Il contributo descrive lo step iniziale di calibrazione di un modello numerico agli elementi finiti, sviluppato per simulare il moto di filtrazione che avviene all'interno di una sezione arginale soggetta al fenomeno di erosione retrogressiva per sottofiltrazione. Le simulazioni descritte sono state sviluppate per riprodurre i dati di monitoraggio piezometrico raccolti per la sezione in esame nell'arco temporale di circa 10 mesi. Periodo in cui non sono stati registrati fenomeni di riattivazione del fontanazzo storico presente in sezione. Il metodo di ottimizzazione parametrica per *inverse analysis* è risultato soddisfacente nel presente caso studio, essendo stato ottenuto a valle un visibile miglioramento della performance del modello iniziale. A tal fine è però rilevante sottolineare come l'applicazione di tale metodo richieda un ampio database di osservazioni nel tempo da utilizzare nel processo indiretto, ma anche, a monte, informazioni ricavate da opportune prove in sito o di laboratorio che permettano di identificare un affidabile set di parametri iniziali per il modello e un possibile intervallo di variazione degli stessi all'interno dei quali muovere il processo iterativo di ottimizzazione. Nel caso in esame, l'esecuzione di prove CPTu in diversi punti del corpo arginale ha permesso una stima affidabile del coefficiente di permeabilità satura, parametro cardine della modellazione del flusso all'interno del dominio.

## Bibliografia

- Bertolini I. (2021). A methodological approach for the performance optimization of transient seepage models through inverse analysis, Ph.D thesis.
- Bertolini I., Gottardi G., Marchi M., Tonni L. (2022b). Probability of reactivation of a sand boil near a river embankment of the Po River. In *Proc. ISGSR 2022*, 14-16 December, Newcastle, Australia,.
- Bertolini I., Gottardi G., Marchi M., Tonni L. Bassi A. and Rosso A. (2022a). Application of CPT to the evaluation of permeability in a Po river embankment prone to backward erosion piping. *Proc. 5<sup>th</sup> International Symposium on Cone Penetration Testing*, 8-10 June 2022. Bologna, Italy.
- Bonelli S.(2013). *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*. Wiley ISTE.
- Marchi M., Camiletti F., Dall'Aglio M., Gragnano C.G., Tonni L., Bassi A., Rosso A., Gombás K., Koch E., Maller M. (2022). *Proc Abstract Book. 28th Annual Meeting of EWG-IE*, 18-21 July, Sheffield,UK, 91-92.
- Marchi M., García Martínez M.F., Gottardi G. and 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).
- Robertson P. K. (2010). Estimating in-situ soil permeability from CPT & CPTu. In: *Proc. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*. Huntington Beach, California.
- Robertson P.K. (2009). Interpretation of cone penetration tests - a unified approach. *Canadian Geot. J.*, 46(11).
- Schaap M.G., Leij F.J., van Genuchten M.T. (2001). *Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions*. *Journal. of Hydrology*, 251(3-4), 163-176.
- Simunek J., Sejna M., van Genuchten M.T. (2006). *The HYDRUS Software Package for Simulating 2D- and 3D Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media*. User Manual.