

ANALISI STATISTICA DEI LIVELLI IDRICI NEI CORPI ARGINALI

Ilaria Butera^{1}, Marco Climaci¹ & Maria Giovanna Tanda²*

(1) Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Politecnico di Torino (Torino)

(2) Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Parma (Parma)

**email:ilaria.butera@polito.it*

ASPETTI CHIAVE

- *Modellazione numerica di falda arginale in condizioni non stazionarie e terreno variamente saturo.*
- *Utilizzo di serie storica lunga 66 anni.*
- *Raffronto livelli in alveo e livelli arginali.*

1 INTRODUZIONE

Le arginature fluviali sono opere fondamentali per la protezione del territorio. La progettazione degli argini richiede il rispetto di requisiti geotecnici e idraulici. Ad esempio, la linea di filtrazione non dovrebbe emergere sul lato campagna del rilevato arginale al fine di evitare l'innescò di fenomeni erosivi che riducono l'efficienza di contenimento dell'acqua e compromettono la stabilità dell'argine. Per identificare la posizione della linea di filtrazione sono disponibili criteri geometrici ed empirici. Una direttiva italiana, pubblicata dal Ministero dei Lavori Pubblici -MLLPP- (1952) per i materiali arginali con conducibilità idraulica inferiore a 10^{-4} m/s, suggerisce una linea con una pendenza tra 1:5 e 1:7 con origine lato fiume alla quota del livello dell'acqua in alveo, generalmente corrispondente alla piena con tempo di ritorno 200 anni (e.g. Autorità di bacino del fiume Po, 2010).

La progettazione di un argine in condizioni stazionarie può portare a sovradimensionare l'argine e quindi ad un progetto non economico (Butera & Tanda, 2006), inoltre può non tenere conto delle possibili instabilità indotte dalle variazioni del livello dell'acqua nel fiume (ad es. Rinaldi et al., 2004; Kwang Seok Yoon, 2005; Stark et al., 2014; Jafari et al., 2019). L'effetto degli abbassamenti sul paramento di monte può infatti essere piuttosto pericoloso ed un'analisi in condizioni stazionarie non considera tali situazioni.

Il presente lavoro esamina il processo di filtrazione in un argine, in condizioni non stazionarie, con particolare attenzione ai massimi livelli piezometrici annui raggiunti nell'argine. A tale scopo è stato utilizzato un modello numerico 3D saturo-insaturo; l'analisi qui riportata riguarda la caratterizzazione statistica dei livelli freatici raggiunti nell'argine.

L'analisi è stata effettuata con riferimento ai dati idrometrici osservati nella stazione di monitoraggio sul fiume Po a Pontelagoscuro (Ferrara, Italia).

2 IL CASO DI STUDIO: I DATI E LORO ELABORAZIONE

Il caso di studio riguarda la sezione di Pontelagoscuro del fiume Po. Il bacino idrografico ha area pari a 70091 km². I dati disponibili si riferiscono ai livelli idrometrici osservati nel periodo dal 1° gennaio 1951 al 31 dicembre 2016. Alcuni cambiamenti morfologici si sono verificati nel fiume durante il periodo esaminato; in particolare, è stato rilevato un abbassamento del letto del fiume (Marchetti, 2002) che ha causato modifiche alla geometria della sezione del fiume; per questo motivo, i livelli idrometrici osservati nel periodo analizzato non possono essere considerati una serie temporale omogenea.

Al fine di utilizzare i consueti strumenti di analisi statistica per serie storiche stazionarie, i dati dei livelli idrometrici sono stati convertiti in valori di portata utilizzando la scala di deflusso di ciascun periodo di osservazione (96 relazioni nel periodo considerato) e successivamente tutti i valori di portata ottenuti sono stati riconvertiti in valori di livello idrometrico utilizzando un'unica scala di deflusso, quella del 1982, scelta arbitrariamente. I livelli idrometrici così ottenuti sono stati interpolati per ottenere una sequenza temporale con discretizzazione oraria da utilizzare nelle simulazioni numeriche. Il set di dati ottenuto in questo modo può essere considerato omogeneo e, in seguito, viene indicato come la serie storica riorganizzata (-SSR-, in

breve).

3 IL MODELLO NUMERICO

Il processo di filtrazione all'interno dell'argine è governato dall'equazione

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(\theta_w) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(\theta_w) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\theta_w) \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_0 \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

dove h è il carico piezometrico nel corpo arginale e θ_w , k and S_0 sono il contenuto idrico, la permeabilità idraulica e il coefficiente di immagazzinamento specifico del terreno. L'eq. (1) è completata dalle condizioni al contorno, dalla condizione iniziale, dalla curva di ritenzione del terreno che descrive il legame $h=h(\theta_w)$ e dalla relazione permeabilità idraulica-contenuto idrico del mezzo poroso ($k=k(\theta_w)$). Per la simulazione numerica del processo di filtrazione è stato utilizzato il codice FEMWATER (Lin et al., 1997).

È stato costruito un modello dell'argine con dimensioni principali e parametri fisici definiti in base alle caratteristiche degli argini di Pontelagoscuro, sebbene sia stata assunta una geometria notevolmente semplificata (Figura 1). Anche se l'argine ha una dimensione trasversale di circa 43 m, il modello è stato assunto di lunghezza pari a 500 m nella direzione x , ortogonale alla direzione della corrente in alveo in modo tale da ridurre l'impatto della condizione al contorno a valle (Figura 1). Nella direzione y è stata considerata solo una fila di elementi, di dimensione pari a 1 m; le superfici dei piani verticali a $y = 0$ m e $y = 1$ m sono state assunte impermeabili ed il modello 3D così costruito si comporta, a tutti gli effetti, come un modello 2D sul piano verticale.

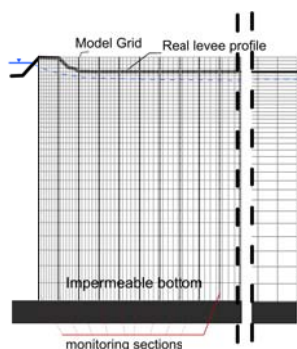


Figura 1. La mesh del modello numerico nel piano [xz]

L'estensione verticale del modello è pari a 66.38 m. Gli elementi del modello cambiano dimensione lungo le posizioni x e z , essendo più piccoli dove sono attese variazioni più elevate del carico piezometrico. Il lato degli elementi varia tra 1 m e 7 m lungo la direzione x e tra 1 m e 5 m lungo la direzione z .

I livelli freatici nell'argine sono stati analizzati in corrispondenza di 10 sezioni a diverse distanze dal paramento di monte (lato fiume); le loro posizioni sono riportate in Tabella 1 ed in Figura 1.

Sezione numero	x(m)	Sezione numero	x(m)
1	11	6	66
2	22	7	77
3	33	8	88
4	44	9	99
5	55	10	110

Tabella 1. Distanza dal fiume delle sezioni arginali considerate per l'analisi dei livelli freatici.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, la parte inferiore del modello, orizzontale, è stata assunta impermeabile ed è situata a -50 m s.l.m.; l'SSR rappresenta la condizione lato fiume, mentre lato campagna è

stato posto un carico piezometrico costante pari al valore iniziale della serie storica dei livelli. Inoltre, il bordo superiore del modello è stato ritenuto impermeabile (assenza di ricarica ed evaporazione). La condizione iniziale di umidità nell'argine è in equilibrio idraulico con il livello idrico fluviale.

La simulazione iniziale è stata impostata imponendo una distribuzione idrostatica con livello idrico pari al primo valore della SSR (ovvero 3,78 m s.l.m.) e conseguentemente la profondità iniziale della falda acquifera risulta di 53,78 m. Le prove preliminari hanno mostrato che la memoria della condizione iniziale nell'analisi dell'SSR (lunga 66 anni) è limitata: differenze nella condizione iniziale pari a 2,7 m dopo 2,5 mesi di simulazione hanno comportato variazioni massime di 0,18 m. Il valore iniziale di 3,78 m s.l.m. corrisponde al livello idrico che viene raggiunto o superato per 128 giorni durante l'anno medio.

Seguendo i rapporti tecnici sugli argini di Pontelagoscuro (ad es. Progetto SISMAPO, 2015), il materiale degli argini è stato considerato un limo sabbioso con porosità totale e conducibilità idraulica pari rispettivamente a 0,406 e $5 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Le relazioni di Van Genuchten (1980) sono state utilizzate per descrivere le proprietà fisiche del suolo insaturo e, a causa dell'assenza di indagini specifiche, i parametri relativi sono stati definiti secondo la procedura introdotta da Sleep (2011). Per le simulazioni qui riportate il terreno insaturo è stato descritto usando i valori per una condizione media di bagnatura-asciugatura: $\alpha = 1.436$ (1/m); $n = 1.3005$; $m = 0.2311$; l'impatto dei valori dei parametri dell'insaturo sui livelli idrici arginali è notevole; per un'analisi in merito si rimanda a Butera et al. (2018).

È stato scritto un codice post processore Matlab per identificare la posizione della superficie freatica in ciascuna sezione di monitoraggio degli argini (cioè dove la pressione dell'acqua è uguale alla pressione atmosferica). Infatti, data la curvatura delle linee di flusso, la distribuzione della pressione non può essere considerata idrostatica nel piano verticale $x-z$ e pertanto la posizione della superficie piezometrica non coincide con l'altezza piezometrica nel punto di calcolo. L'elevazione della linea di filtrazione nell'argine è stata calcolata in ciascuna sezione mediante un'interpolazione bi-lineare del campo di pressione, che a sua volta è stata determinata mediante il codice Femwater.

4 RISULTATI DALL'ANALISI DELLA SERIE STORICA

È stata effettuata un'analisi statistica dei livelli d'acqua massimi annui raggiunti nelle sezioni considerate nella Tabella 1 per la simulazione della SSR di 66 anni.

Per ogni sezione di studio dell'argine e per il fiume è stato estratto il valore massimo annuo; le serie così ottenute (66 dati per ogni sezione) sono state elaborate per identificare la distribuzione statistica che meglio si adattasse ai dati. Sono state sperimentate sei distribuzioni (normale, log-normale, gamma, GEV, dei valori estremi ed esponenziale). È emerso che, secondo il criterio di informazione bayesiana, la distribuzione che si adattava meglio ai dati in tutte le sezioni era quella normale.

Utilizzando i parametri della migliore distribuzione statistica, è stato quindi calcolato il periodo di ritorno di ciascun valore massimo annuo nelle sezioni arginali e confrontato con il periodo di ritorno del livello massimo annuo nel fiume per lo stesso anno. I risultati sono mostrati in Figura 2. Sebbene sia possibile che ascissa ed ordinata non si riferiscano allo stesso evento di piena, i punti lontani dalla bisettrice evidenziano che durante un evento di piena il grado di stress per le sezioni arginali è diverso da quello del fiume. I punti situati in vicinanza della bisettrice nei pannelli di Figura 2 indicano che, in un certo anno, il fiume e la sezione dell'argine hanno subito eventi della stessa gravità. I punti situati sotto la bisettrice corrispondono ad eventi che sono stati più gravosi per il fiume che per le sezioni dell'argine; l'opposto vale per i punti sopra la bisettrice. In quest'ultimo caso, l'argine è cimentato anche quando i livelli nel fiume non sono molto alti. Ciò è dovuto alla non linearità del processo che mette in relazione i livelli della piena nel fiume con i livelli arginali. In effetti, non solo il valore massimo degli idrogrammi influenza i livelli freatici nell'argine, ma anche la loro forma (ovvero la durata dell'altezza idrometrica nel fiume che può essere correlata al volume della piena).

Questi risultati mostrano l'importanza di esplorare l'uso di idrogrammi sintetici (Butera & Tanda, 2006) per la progettazione di un argine in condizioni non stazionarie in modo da considerare non solo i valori

idrometrici massimi ma anche l'intero andamento idrometrico dell'onda di piena.

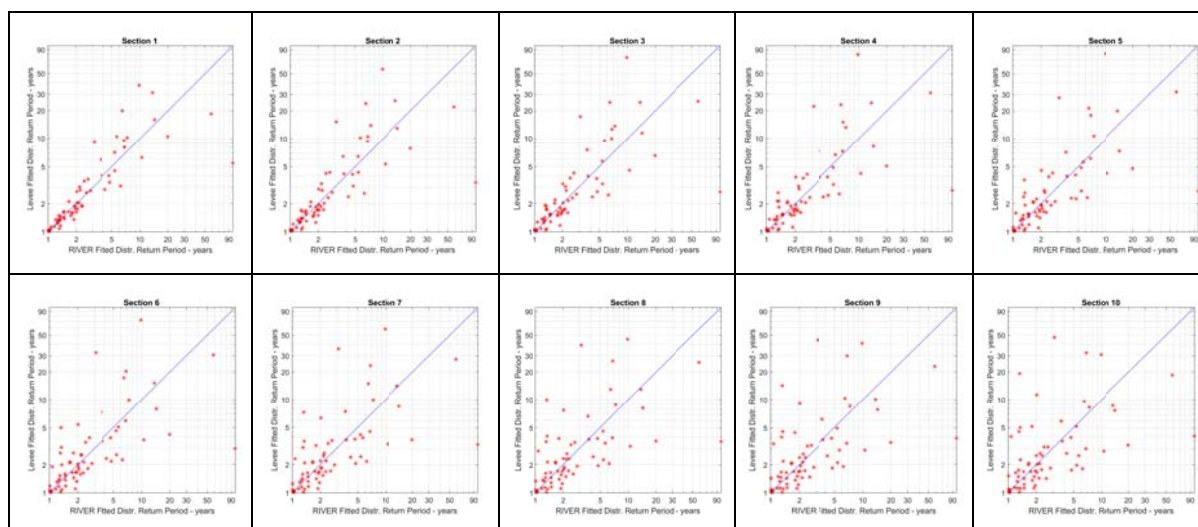


Figura 2. Tempo di ritorno dei livelli piezometrici massimi annui in diverse sezioni arginali in funzione del tempo di ritorno della piena.

RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata in parte finanziata dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, attraverso il progetto DILEMMA (Imaging, Modeling, Monitoring and Design of Earthen Levees).

Si ringrazia l'Agenzia Interregionale per il Fiume Po per il supporto nel reperimento dei dati.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Autorità di bacino del fiume Po. La verifica sismica delle arginature, SISMAPO Project, Final report.2015
- Autorità di bacino del fiume Po. Variante al PAI. Relazione Tecnica, allegato alla delib. 7 del 21 dicembre 2010, 2010.
- Butera, I. & Tanda M. G. Analysing river bank seepage with a synthetic design hydrograph, *Water Management*, 119-127, 2006.
- Butera, I., Climaci M. & Tanda M.G. Transient Unsaturated Seepage Analysis of River Levees. Proceeding. of the 5th IAHR Europe Congress — New Challenges in Hydraulic Research and Engineering, 2018.
- Kwang Seok Yoon. Failure Causes and Design Methods of River Levees, Second Joint Seminar between IWHR and KICT, Bijing, Chine, 2005.
- Jafari N.H., Cadigan J.A., Stark T.D., & Woodward M.L. Phreatic surface mitigation through an unsaturated levee embankment, *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(11): 05019010, 2019
- Lin, H.C.J., Richards D.R., Talbot C.A., Yeh G.T., Cheng J.R., Cheng H.P. & Jones N.L. FEMWATER: A three-dimensional finite element computer model for simulating density-dependent flow and transport in variable saturated media. Technical Report CHL-97-12. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Exp. Station. Vicksburg, Mississippi. USA, 1997.
- Marchetti M. Environmental changes in central Po Plain (northern Italy) due to fluvial modifications and anthropogenic activities. *Geomorphology*, Vol 44, 361-373, 2002.
- MLLPP. Ministero dei lavori pubblici, Circolo Superiore di ispezione per il Po di parma. Norme per la sistemazione delle arginature di po e affluenti. 1952
- Rinaldi M., Casagli N., Dapporto S., Gargini A. Monitoring and modelling of pore water pressure changes and riverbank stability during flow events, *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 237-254, 2004
- Sleep, M. D. *Analysis of Transient Seepage Through Levees*. Blacksburg, VA, 2011.
- Stark T.D., Jafari N.H., Leopold A.L. & Brandon T.L. Soil compressibility in transient unsaturated seepage analyses, *Canadian Geotech.*, J. 5,858-868, 2014
- Van Genuchten M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am.J.*,44, 892-898, 1980.