

Sul calcolo dei tempi di saturazione delle arginature

Alberto Pistocchi¹, Federico Donati¹, Oscar Zani¹

¹Autorità dei bacini regionali romagnoli

P.zza Morgagni, 2

47100 Forlì. E-mail: alberto.pistocchi@gecosistema.it

SOMMARIO. La memoria confronta la soluzione numerica dell'equazione di Richards bidimensionale con il modello analitico di Marchi (Giugni e Fontana, 1999) e propone di integrare tale modello con una soluzione tipo Green-Ampt alla filtrazione orizzontale a saturazione variabile, per definire un maggiorante della saturazione nelle arginature in corrispondenza di un livello in alveo della piena di assegnata durata. Il modello proposto, di cui si esemplificano i risultati in alcune sezioni rappresentative di arginature fluviali, è stato adottato dall'Autorità dei bacini regionali dell'Emilia Romagna all'interno delle proprie direttive inerenti le verifiche idrauliche, e si presta per la sua semplicità computazionale ad applicazioni su sistemi estesi in cui sia poco vantaggioso procedere alla simulazione numerica di dettaglio di ogni singola porzione di arginatura.

1INTRODUZIONE E POSIZIONE DEL PROBLEMA

La valutazione delle prestazioni di un sistema di arginature è essenzialmente riferibile al calcolo di un fattore di sicurezza per la stabilità complessiva o per i fenomeni di sifonamento.

Generalmente, si fa riferimento a schemi cautelativi che sono estremamente utili per la progettazione in quanto consentono con poco sforzo di ottenere un dimensionamento di massima dei corpi arginali. In casi di impegno significativo, è opportuno simulare il comportamento delle arginature progettate in corrispondenza di piene di progetto, verificando in particolare il comportamento idraulico dell'ammasso filtrante costituito dal corpo arginale. La distribuzione delle pressioni neutre e delle velocità di filtrazione (o dei gradienti) al suo interno è infatti chiaramente identificabile come la *driving force* dei fenomeni di dissesto che possono interessarlo.

Un criterio cautelativo consiste nel valutare le pressioni neutre e i relativi gradienti all'interno di un corpo di terra in ipotesi di flusso stazionario.

Tale approccio, indicato per le dighe in terra (p.es. Supino, 1965), rischia di condurre a valutazioni inadeguate per il caso delle arginature fluviali, che generalmente si saturano in tempi lunghi rispetto a quelli del transito delle piene che li interessano, e che configurano situazioni di flusso transitorio di cui è opportuno tenere conto.

In passato, vari modelli di filtrazione in condizioni di moto vario sono stati proposti per l'applicazione ad arginature fluviali. Giugni e Fontana (1999) sviluppano una revisione degli approcci praticati confrontando soluzioni numeriche dell'equazione del flusso nelle falde a pelo libero con i modelli analitici proposti per lo studio del fenomeno da Supino e Marchi rispettivamente, e derivati da soluzioni dell'equazione del flusso sotto ipotesi semplificative per i dettagli delle quali si rinvia alla memoria citata.

In pratica, tuttavia, le ipotesi dei modelli citati si discostano significativamente dalle reali condizioni di campagna, e possono condurre a significative sottostime delle pressioni neutre e dei loro gradienti. Per far fronte a questo problema, mantenendo la semplicità applicativa di modelli analitici per le verifiche, nell'ambito delle attività

di pianificazione dell'Autorità dei bacini regionali dell'Emilia Romagna è stato sviluppato un metodo per il calcolo dell'avanzamento del fronte saturo all'interno delle arginature fluviali, in relazione alla persistenza indefinita di un livello idrico in alveo. Tale metodo, che consiste in una correzione apportata al modello analitico standard detto di Marchi (Giugni e Fontana, 1999), consente di ottenere un andamento delle superficie di saturazione all'interno dell'ammasso filtrante che è sostanzialmente coerente con quello ottenuto con un modello numerico a saturazione variabile, senza apprezzabile complicazione computazionale.

Il seguito della memoria descrive l'approccio seguito e traccia alcune conclusioni applicative.

2IL MODELLO ANALITICO DI BASE

Il modello analitico di base ipotizzato è quello detto di Marchi (Giugni e Fontana, 1999), che rappresenta una soluzione dell'equazione del flusso monodimensionale in una falda a pelo libero sotto le seguenti ipotesi semplificative:

- flusso nullo lungo la direzione perpendicolare al pelo libero e al fondo impermeabile della falda;
- carico prefissato a lato fiume;
- superfici a uguale carico piane e verticali (ipotesi di Dupuit);
- altezza della perturbazione del livello in alveo dovuta alla piena trascurabile rispetto all'altezza della falda;
- idrogramma di piena rettangolare, cioè innalzamento del tirante idrico in alveo h_0 supposto istantaneo e mantenuto a tale livello per un tempo T_0 , dopo il quale abbassamento istantaneo al livello originario: è la condizione più gravosa, rappresentando l'involuppo di tutti i possibili idrogrammi di piena di altezza massima h_0 e durata T_0 , perciò a favore della sicurezza.

Sotto tali ipotesi si ottiene la seguente formulazione finale:

$$h_1(x,t) = h_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2} \sqrt{\frac{n}{kH_0 t}} \right) \right] \quad (1)$$

dove:

h_1 è l'innalzamento del livello di falda dal livello originario;

h_0 è l'innalzamento in alveo del livello dell'acqua dovuto alla piena,

H_0 è l'altezza originaria della falda;

k è la conducibilità idraulica in condizioni sature;

n è la porosità effettiva;

x e t sono rispettivamente la progressiva di avanzamento del fronte e il tempo.

Il modello di Marchi in un piano verticale x, h è rappresentato da una iperbole, che interseca l'asse delle ordinate (altezza piezometrica h rispetto al livello originale di falda) alla quota h_0 , mentre tende asintoticamente per $x \rightarrow \infty$ all'altezza originale di falda.

Il modello è stato verificato mettendolo a confronto con un modello numerico bidimensionale che descrive il flusso in una sezione di arginatura in ipotesi di saturazione variabile (soluzione della ben nota equazione di Richards). Per implementare il modello si è utilizzato il codice numerico UPF (Gottardi e Venutelli, 2001), che risolve l'equazione mediante il metodo degli elementi finiti a volume di controllo.

L'esplorazione numerica è stata condotta su un campione significativo di sezioni delle arginature dei corsi d'acqua di competenza dell'Autorità dei bacini regionali dell'Emilia Romagna, di cui erano disponibili tutte le informazioni idrauliche e geotecniche.

In tutti i casi studiati, il modello di Marchi ha mostrato un ragionevole adattamento alla soluzione numerica, coerentemente con quanto osservato da Giugni e Fontana (1999). Tuttavia, mentre risultava correttamente descritta la coda della falda al piede esterno dell'arginatura, si è manifestata la sistematica sottostima delle pressioni neutre nella parte alta dell'arginatura, ove il modello risulta poco cautelativo. È bene osservare che generalmente questa parte dell'arginatura è poco influente ai fini della stabilità globale del manufatto, mentre possono manifestarsi criticità allorquando si considerano le sommità arginali che potrebbero dare luogo a scosscendimenti pericolosi in quanto prodromici a successivi sormonti. Nella figura 2 sono riportati alcuni esempi significativi del confronto effettuato.

3IL MODELLO DI GREEN-AMPT

Il modello di Green-Ampt descrive una infiltrazione progressiva con moto frontale di

propagazione del fronte umido, che separa il suolo bagnato da quello nelle condizioni originarie di saturazione.

Il modello originario è stato proposto per una infiltrazione in terreno naturale, in condizioni di flusso verticale; per l'analisi dei rilevati arginali si è modificato il modello per riprodurre le condizioni di moto orizzontale. Per una descrizione delle ipotesi alla base di questo modello, di grande importanza concettuale ed ampiamente utilizzato nella modellistica idrologica, si rinvia a Greppi, 1999, e a Natale, 1996.

Nell'applicazione a flusso orizzontale, il moto di filtrazione viene descritto applicando l'equazione di Green-Ampt ai singoli tubi di flusso ipotizzati orizzontali (ipotesi di Dupuit), pervenendo alla seguente formula:

$$x = \sqrt{\frac{2Kt}{M}(H - z + S_s)} \quad (2)$$

dove:

x è la progressiva;

K è la conducibilità idraulica in condizioni di completa saturazione;

t è il tempo (la variabile indipendente);

$H - z$ è il carico imposto dalle condizioni al contorno, determinato dall'altezza del tirante idrico;

M è l'infiltrazione cumulata e valuta la quantità di vuoti non riempiti dall'acqua: è definito da $M = \theta_s - \theta_i$ dove θ_s è il contenuto d'acqua a saturazione, ed è uguale alla porosità effettiva, mentre θ_i è il contenuto d'acqua iniziale;

S_s è il potenziale di suzione del fronte umido, parametro introdotto nel modello di Green-Ampt per rappresentare la risalita capillare nel suolo; tale parametro è stato valutato per le classi tessiture standard da Rawls, 1983.

Il modello di Green-Ampt è stato costruito non tenendo conto i legami non lineari esistenti fra conducibilità idraulica e pressione capillare con la saturazione. È stato introdotto il termine potenziale di suzione al fronte umido S_s per prendere in considerazione almeno in parte le condizioni di non completa saturazione del mezzo poroso.

La deduzione della (2) è riportata in Appendice. A norma di tale equazione, il fronte di saturazione viene descritto per assegnato tempo come una parabola $x(z)$ la cui concavità è rivolta verso il basso.

La figura 2 riporta, insieme alla soluzione numerica di Marchi e a quella del modello numerico, la soluzione proposta.

4 CONFRONTO E CONCLUSIONI

Per un confronto diretto delle tre diverse interpretazioni del fenomeno, sono riportati in figura 1 alcuni esempi di sezioni arginali. Gli esempi sono rappresentativi del comportamento osservato nella generalità delle arginature del territorio dei bacini regionali dell'Emilia Romagna, su cui il modello è stato sviluppato. Esula dagli scopi della presente memoria, che ha l'intenzione di illustrare una soluzione pratica all'equazione che sovrintende il fenomeno, una caratterizzazione di dettaglio delle arginature su cui si è svolta la valutazione; per tali aspetti si rinvia alla direttiva emanata da Autorità dei bacini regionali dell'Emilia Romagna, 2003.

Dal confronto si possono ricavare alcune osservazioni, ipotizzando che il modello numerico rappresenti il più vicino alla realtà del fenomeno in quanto non introduce sostanziali semplificazioni nella soluzione dell'equazione di Richards.

Il modello di Marchi pare sufficientemente cautelativo nel descrivere la prima coda di avanzamento del fronte di saturazione, che generalmente avanza più lentamente secondo il modello numerico.

Il modello di Green-Ampt pare sufficientemente cautelativo per descrivere le condizioni di saturazione della parte alta dell'arginatura. In tale zona assume importanza il complesso dei fenomeni connessi alla saturazione variabile dell'arginatura, evidentemente trascurata nel modello di Marchi che si applica a piccole perturbazioni del livello statico della falda a pelo libero.

Si può proporre pertanto di correggere il modello di Marchi utilizzandolo insieme al modello di Green-Ampt proposto.

L'involuppo dei due modelli consente di identificare un estremo superiore della posizione del fronte di saturazione all'interno dell'argine, riportando in media valori maggioranti rispetto alla soluzione numerica. Questo aspetto pone la soluzione analitica a favore di sicurezza, e utilizzabile in prima approssimazione con notevoli semplificazioni computazionali nell'indagine della propensione alla saturazione dei rilevati arginali in terra ai fini delle valutazioni di

Pistocchi, A., Donati, F.

sicurezza territoriale (Autorità dei bacini regionali dell'Emilia Romagna, 2003).

5APPENDICE - DEDUZIONE DELL'EQUAZIONE (2)

Si consideri il bilancio di massa del generico tubo di flusso di superficie normale al flusso unitaria, ipotizzato orizzontale, a quota z rispetto ad un riferimento.

In fase di imbibizione, l'unico ingresso al tubo di flusso è la portata q per unità di superficie, che si infila dal lato corrispondente all'alveo.

Si suppone l'avanzamento del fronte umido a pistone, cioè si ipotizza che il suolo nel tubo di flusso sia saturo fino alla distanza x cui è giunto il fronte di saturazione, e a saturazione iniziale oltre tale distanza. La massa d'acqua contenuta nel tubo di flusso ha pertanto volume Mx .

L'equazione di continuità si scrive:

$$q = M (dx/dt) \quad (A.1)$$

essendo:

$$q = K (H + S_s - z)/x \quad (A.2)$$

la portata per unità di superficie, calcolata ipotizzando la validità della legge di Darcy come è usuale nel modello di Green-Ampt. Le equazioni precedenti possono essere combinate in un'equazione differenziale del prim'ordine a variabili separabili:

$$K (H + S_s - z)/x = M (dx/dt) \quad (A.3)$$

la cui integrazione fornisce la (2) con la condizione iniziale $x=0$ per $t=0$.

BIBLIOGRAFIA

Autorità dei bacini regionali dell'Emilia Romagna, "Direttiva inerente le verifiche idrauliche e gli accorgimenti tecnici da adottare per conseguire gli obiettivi di sicurezza idraulica definiti dal Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico", www.regione.emilia-romagna.it/baciniromagnoli, 2003

M.Giugni, N.Fontana, "Sulla determinazione della linea di infiltrazione all'interno di un argine fluviale", "L'acqua", n.5, 1999

G.Gottardi, M.Venutelli, "UPF: two-dimensiona finite-element groundwater flow model for saturated-unsaturated soils" Computers & Geosciences, n.27, pp. 179-189, 2001

M.Greppi, "Idrologia" Hoepli ed., Milano, 1999

L.Natale, "Manuale dell'Ingegnere Civile" Vol. 1 Esac Zanichelli, Bologna, 1996

W.J.Rawls "Green-Ampt Infiltration parameters from soils data" Journal of Hydraulic Engineering, vol. 109, no. 1, 1983

G.Supino, "Le reti idrauliche" Patron ed. Bologna, 1965

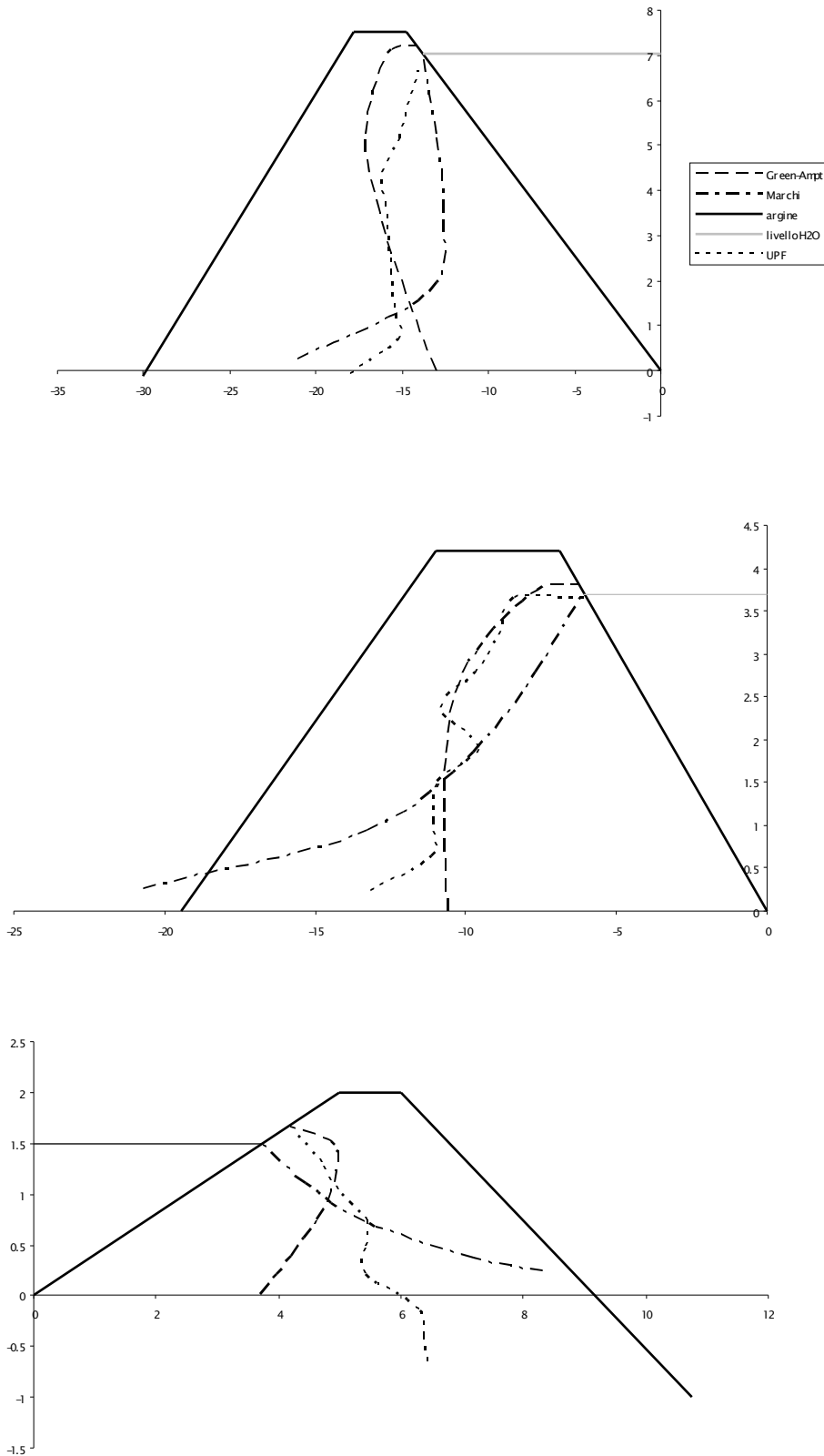


Figura 1. Posizione del fronte di saturazione ad un prefissato istante temporale: confronto fra il modello numerico (a tratteggio uniforme), e i due modelli analitici (Green-Ampt a tratteggio uniforme largo, Marchi a punto e tratteggio), in tre casi significativi. Le grandezze degli assi x e y dei grafici sono in metri.