

STUDIO DEL FENOMENO DEL SIFONAMENTO NEI RILEVATI ARGINALI

Emiliano Gaspari ⁽¹⁾, Aldo Fiori ⁽²⁾, Alessandro Cappelli ⁽¹⁾, Guido Calenda ⁽²⁾

⁽¹⁾ Libero professionista

⁽²⁾ Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile, Università di Roma Tre

Sommario

Viene proposta l'applicazione di un metodo speditivo per la verifica dei rilevati arginali omogenei al sifonamento, basato sui risultati di simulazioni eseguite con un modello di filtrazione in mezzi non saturi in condizioni non stazionarie. Il metodo impiega una formulazione adimensionale dei principali parametri geometrici e fisici che caratterizzano il problema. I risultati sono presentati sotto forma di abachi utili al predimensionamento della sezione arginale. L'utilizzo del metodo è esemplificato con lo sviluppo di un esempio applicativo.

Introduzione

Le arginature fluviali possono essere considerate la più antica tecnica di protezione dei territori pianeggianti inondabili, e come tali sono stati oggetto di un'intensa attività di ricerca destinata a definire corretti criteri di dimensionamento.

Uno dei maggiori rischi cui sono sottoposti i rilevati arginali è il sifonamento. L'innalzamento dei livelli idrici in alveo, dovuti al passaggio di una piena, alimenta il moto di filtrazione nei meati del terreno costituente il rilevato arginale e la sua fondazione. Quando la differenza tra il carico idraulico nel fiume e quello lato campagna non sia completamente dissipata dalle forze di attrito tra liquido e matrice solida del terreno, possono svilupparsi elevati gradienti idraulici a valle del rilevato, lungo il paramento o al piede del rilevato. Qualora la forza di trascinamento dovuta al gradiente idraulico del moto di filtrazione supera il peso immerso del materiale sciolto costituente il terreno, questo può essere asportato dalla corrente.

Il fenomeno è enfatizzato dalla presenza di terreni di tessitura fine non coesivi. Si può innescare, allora, una erosione retrograda, il cui propagarsi è accelerato dalla progressiva riduzione del percorso di filtrazione dovuto all'asportazione del materiale, che induce gradienti idraulici sempre più elevati, sino al collasso del rilevato arginale.

Il sifonamento delle arginature è stato oggetto di numerosi studi, riguardanti sia il rilevato arginale vero e proprio, sia i terreni di fondazione a tergo dell'argine.

Nel caso in cui la zona fuoriuscita dell'acqua è localizzata sul paramento del rilevato, si determina il progredire della linea d'infiltrazione durante la piena, verificando che essa non giunga a lambire il

paramento di valle. Tale evento si manifesta con la comparsa della sorgente sospesa, che può innescare, in presenza di terreni sensibili, l'erosione sintomo del sifonamento.

Formulazione classiche per la soluzione del problema sono state proposte da Marchi (1957, 1961) e da Supino (1955, 1965). Gli autori, utilizzando modelli di flusso in condizioni di saturazione, nell'ipotesi di validità della approssimazione di Dupuit e limitandosi al caso in cui lo spessore della falda subalvea sia trascurabile rispetto all'innalzamento del livello idrico in alveo, hanno ottenuto relazioni analitiche in forma chiusa, valide per il dimensionamento della larghezza della sezione arginale, per diverse forme dell'idrogramma di piena. Più recentemente Giugni e Fontana (1999), rimuovendo le ipotesi semplificative dei modelli classici e procedendo alla soluzione del campo del moto per via numerica, hanno proposto abachi per il dimensionamento della sezione arginale. In questo caso il problema tecnico del dimensionamento è risolto prescrivendo un valore limite del carico idraulico sul paramento di valle in funzione della larghezza del rilevato e dell'ampiezza dell'onda di piena transitante in alveo.

Nel caso in cui la zona di fuoriuscita dell'acqua dal terreno sia localizzata al piede del rilevato, interessando il terreno in sito, si formano delle polle di fuoriuscita, note col nome di fontanazzi. Nella pratica progettuale si è soliti procedere alla verifica al sifonamento della fondazione valutando il coefficiente di sicurezza $F_s = J_c / J_{z,max}$ dato dal rapporto tra il gradiente idraulico critico, che annulla la tensione efficace nel suolo, relativo alla specifica classe tessiturale, ed il massimo valore della componente verticale del gradiente del carico idraulico in uscita. Diversi valori del coefficiente di sicurezza sono consigliati, in dipendenza anche della precisione con cui si conducono le determinazioni del gradiente idraulico. Qualora tale gradiente sia determinato localmente con procedure affidabili, è possibile adottare un valore un coefficiente di sicurezza dell'ordine di 2,0 – 2,5. Quando, invece, si esegue soltanto una stima del valore medio del gradiente, ad esempio con metodi alla Bligh-Lane (Ojha et al., 2003), per compensare la maggiore incertezza sul valore locale all'affioramento è necessario utilizzare un valore del coefficiente di sicurezza superiore 4 – 5 (Colombo, Colleselli 1998).

Obiettivo fondamentale del presente studio è, dunque, di fornire uno strumento che, non pretendendo di sostituire una modellistica di dettaglio, consenta un agevole predimensionamento, tenendo conto dei gradienti locali, in un ampio campo di possibili configurazioni arginali. Con la procedura proposta si fa riferimento a una valutazione locale del gradiente idraulico in uscita e, grazie all'utilizzo di un modello a flusso parzialmente saturo, prende in considerazione anche il contributo al carico dovuto alla fascia capillare, spesso trascurato nelle elaborazioni tecniche.

Inquadramento matematico del problema

Modello di Richards (con pedofunzioni di Van Genuchten)

Il terreno costituente il complesso rilevato fondazione è stato schematizzato come mezzo poroso continuo solido-fluido in cui si è tenuto conto anche della fase gassosa attraverso le forze capillari. Nel modello adottato, sia l'acqua contenuta nei pori, sia la matrice solida sono da ritenersi incomprimibili. La variazione della massa di un volume elementare nel tempo dt è legata unicamente alla variazione del contenuto volumetrico dell'umidità θ .

L'equazione di continuità può essere dunque scritta come

$$\frac{d\theta}{dt} = -\nabla \cdot \bar{q} \quad (1)$$

dove \bar{q} rappresenta il flusso volumetrico che attraversa la frontiera dell'elemento elementare considerato, nell'istante dt . Per l'equazione del moto si ha:

$$\bar{q} = -K(\psi)\nabla(\psi + z) \quad (2)$$

dove ψ è l'altezza di risalita capillare, ed il carico idraulico può essere espresso come $h = (\psi + z)$. La conduttività idraulica, per l'ipotesi di terreno omogeneo isotropo, è una grandezza scalare dipendente, per la condizione di parziale saturazione, dal contenuto volumetrico di umidità tramite l'altezza di risalita capillare $K = K[\psi(\theta)]$.

Introducendo la funzione $C(\psi) = \partial\theta/\partial\psi$ e combinando la (1) con la (2) si ottiene l'equazione di Richards (1934), utilizzata per descrivere il campo del moto nella sezione arginale:

$$C(\psi)\frac{\partial\psi}{\partial t} = K(\psi)\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right) \quad (3)$$

Pedofunzioni

Nella (3) compaiono le relazioni $\theta(\psi)$ $C(\psi)$ $K(\psi)$ che dipendono dalle caratteristiche del suolo e sono indicate in letteratura con il nome di pedofunzioni. Nel presente studio sono state utilizzate le pedofunzioni proposte dal Van Genuchten, (1980) sia per la struttura analitica delle relazioni proposte, che assicurano una maggiore stabilità della soluzione numerica, sia per la possibilità di far riferimento a numerosi studi di taratura sperimentale dei parametri.

$$C(\psi) = -\alpha m \beta (\vartheta_s - \vartheta_r) (\alpha\psi)^{\beta-1} [1 + (\alpha\psi)^\beta]^{-(m+1)} \quad (4)$$

$$K(\psi) = K_s \frac{\left\{1 - (\alpha\psi)^{\beta-1} [1 + (\alpha\psi)^\beta]^{-m}\right\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^\beta]^{m/2}} \quad (5)$$

con $\psi \leq 0$, dove. θ_s e θ_r sono rispettivamente il contenuto volumetrico a saturazione naturale e di ritenzione e α $[1/L]$, β , m sono parametri di taratura ottenuti per diverse classi tessiturali del terreno correlati tra loro dalla relazione di Mualem (1976) $m = 1 - 1/\beta$, K_s è la conduttività idraulica a saturazione. Si è fatto particolare riferimento al lavoro di Carsel e Parrish, (1988), in cui gli autori hanno determinato i parametri delle pedofunzioni di Van Genuchten per tutte le classi tessiturali individuate dalla classificazione dei terreni proposta dall' U. S. Department of Agriculture.

La dipendenza delle pedofunzioni dall'altezza di risalita capillare e, tramite essa, dal carico idraulico, introduce nel modello una forte non linearità, e l'integrazione dell'equazione di Richards, con le dovute condizioni al contorno, può essere effettuata solo per via numerica. Allo scopo è stato utilizzato il programma VS2SI (Hsieh et al, 1996) sviluppato presso U.S.G.S., che integra

l'equazione di Richards ed è particolarmente adatto allo studio di fenomeni di moto vario anche in rapida evoluzione, quali sono le piene fluviali.

Adimensionalizzazione dell' equazione di Richards

L'equazione di Richards, scritta per semplicità in funzione del carico idraulico, è stata utilizzata nella sua forma adimensionale

$$C'(h') \frac{\partial h'}{\partial t'} = K'(h') \left(\frac{\partial^2 h'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 h'}{\partial z'^2} \right) \quad (6)$$

avendo posto $\alpha' = \alpha h_0$; $h = h' h_0$; $K = K_s K'$; $x = x' \Omega$, $z = z' \Omega$; $t = t' T$;

$$\Omega = \sqrt{\frac{K_s h_0 T}{\theta_s - \theta_r}} \quad (7)$$

dove: h_0 e T , sono rispettivamente l'ampiezza ed il periodo dell'onda di piena transitante in alveo, α è il parametro del Van Genuchten che maggiormente caratterizza il comportamento del terreno e K_s è la conduttività idraulica a saturazione del mezzo.

Come si evince dalle precedenti posizioni, l'equazione di Richards è stata adimensionalizzata rispetto a grandezze che potessero descrivere esaurientemente la configurazione arginale (figura 1). Tramite la (7) e tenendo conto delle posizioni fatte, risultano infatti determinate: la scelta della classe tessiturale del terreno costituente l'arginatura, le caratteristiche, in termini d'ampiezza h_0 e periodo T , della piena transitante in alveo, le caratteristiche geometriche della sezione di prova, quali la larghezza della sezione L' , lo spessore di un eventuale strato permeabile di base H_0' e le pendenze medie dei paramenti di monte e valle. Analogamente è stato possibile definire una forma adimensionale per la componente verticale del gradiente idraulico. Tale grandezza viene monitorata in uscita dal terreno al piede del rilevato ai fini della determinazione della condizione di possibile sifonamento della fondazione arginale:

$$J_z' = \frac{\partial h}{\partial z} \frac{\Omega}{h_0} = \frac{\partial h'}{\partial z'} \quad (8)$$

Caratterizzazione tessiturale del terreno costituente il complesso rilevato fondazione

L'approccio adimensionale utilizzato nel presente studio permette di svincolarsi, almeno in parte, dalle caratteristiche del terreno, poiché tanto la permeabilità a saturazione quanto la porosità efficace sono contenute nel gruppo Ω il che consente, per quanto attiene le proprietà idrauliche e lo studio dello sviluppo del moto filtrante, di far riferimento alla sola classe tessiturale della frazione fine. In particolare si è utilizzata la classificazione sviluppata dall'USDA riportata tramite il triangolo delle classi tessiturali (figura 2). Il triangolo indica sui lati la percentuale di argilla, limo e sabbia. Combinando insieme differenti percentuali dei tre materiali, si ottengono le varie classi di

terreno. Per ogni classe tessiturale così individuata, Carsel e Parrish (1988) hanno stimato sperimentalmente i parametri delle pedofunzioni del modello di Van Genuchten.

Poiché “gli argini venivano in passato costruiti quasi esclusivamente con materiale scavato in golena” secondo “ antiche regole” che suggerivano la posa in opera di “una miscela di sabbia 2/3 e argilla 1/3” (Da Deppo et al. 1995), sul triangolo delle classi tessiturali è stata individuata una fascia d’interesse che, partendo dalla composizione di letteratura, allargasse il campo d’indagine a terreni la cui porzione fine è costituita da una componente sabbiosa compresa tra il 50% e l’80 %, con una componente limo-argillosa ad essa complementare. Le tessiture ricadenti all’interno dell’intervallo risultano essere secondo la schematizzazione USDA: Sandy Clay, argilla sabbiosa; Sandy Clay Loam, argilla e limo sabbiosi; Sandy Loam, limo sabbioso; caratterizzate dai relativi parametri di Van Genuchten.

Tra queste sono state scelte due tessiture per lo svolgimento delle simulazioni :

argilla sabbiosa: $\alpha = 2,7 \quad \beta = 1,23$

limo sabbioso: $\alpha = 7,5 \quad \beta = 1,89$

che tra le classi selezionate presentano i valori estremi dei parametri.

Condizioni iniziali ed al contorno

L’analisi in moto vario necessita della definizione del valore del carico idraulico all’istante iniziale in tutti i punti del dominio del moto. Poiché quest’ultimo dipende, nella sua forma adimensionale, dal contenuto volumetrico d’umidità $h' = h'(\theta)$ tramite l’altezza di risalita capillare, si è scelto di definire il campo d’umidità che interessa il complesso rilevato fondazione all’istante iniziale, di modo che risulti determinato il valore iniziale del carico idraulico in ogni punto del dominio del moto. Per ottenere risultati che prendessero in considerazione le condizioni più proibitive, il livello di falda subalvea all’istante iniziale è stato posto pari alla quota del piano campagna per tutto lo spessore H_0 della fondazione. Nel rilevato vero e proprio il campo di umidità iniziale è stato definito con il metodo del profilo d’equilibrio. Nella definizione delle condizioni al contorno il dominio del moto è limitato, in fondazione da una base orizzontale impermeabile, e a campagna è limitato da una superficie verticale a carico costante, in modo da simulare una superficie lontana dalla zona del campo del moto che si vuole monitorare. Il paramento di valle del rilevato e la superficie orizzontale a campagna sono state schematizzate come superfici di possibile effiltrazione. Sul paramento lato fiume il valore del carico segue l’evoluzione della superficie libera in alveo. la piena è stata simulata imponendo che tale superficie evolva secondo un idrogramma sinusoidale unitario dato da $h' = \sin(\pi t')$ per $0 \leq t' \leq 1$, seguito da un fase di durata $\Delta t' = 10$ con tirante nullo, allo scopo di simulare lo svuotamento del rilevato.

Analisi della risposta all'idrogramma sinusoidale

La risposta del sistema rilevato-fondazione alla sollecitazione dovuta alla variazione del carico idraulico, imposta sul paramento di monte dall’idrogramma sinusoidale, può essere valutata monitorando la variazione nel tempo del gradiente adimensionale al piede del rilevato (figura 3). La forma dell’argine, impiegata nell’analisi in oggetto, è assunta triangolare, poiché, stante la natura adimensionale dei parametri utilizzati, la presenza di terrazzamenti non influenza i risultati delle simulazioni.

È possibile individuare due fasi: la prima, per $0 \leq t' \leq 1$ presenta un andamento prossimo al sinusoidale. Il valore estremo risulta ritardato nel tempo rispetto alla massima ampiezza della piena

in alveo. Successivamente si può facilmente riconoscere la risposta libera di un sistema sollecitato da un impulso iniziale costituito dal valore residuo di pressione nell'istante $t'=1$. Questa fase della risposta è dovuta allo svuotamento del rilevato. L'andamento descritto si presenta in tutti i punti d'osservazione posti a valle del rilevato, con valori massimi registrati sempre nella coppia di punti posti alla base del rilevato stesso, valori sui quali deve essere effettuata la verifica al sifonamento. Tramite la singola simulazione si può monitorare l'andamento nel tempo del gradiente idraulico adimensionale registrato al piede del rilevato, lato campagna, e da questo andamento, estrarre il valore massimo, che viene dunque associato ai parametri che caratterizzano la simulazione. Ogni schema arginale di prova è dunque caratterizzato da un valore della pendenza media del paramento di monte e di valle, da un valore della larghezza adimensionale L' , dallo spessore dello strato permeabile di base H_0' , dai parametri α' e β , e dal valore massimo del gradiente idraulico adimensionale registrato al piede durante la piena $J'_{z_{\max}} = J_{z_{\max}} \Omega/h_0$.

Analisi di sensitività dei parametri

Le simulazioni condotte hanno evidenziato l'influenza dei diversi parametri caratterizzanti la configurazione arginale sul massimo gradiente adimensionale, misurato nel singolo evento, al piede del rilevato lato campagna in uscita dal terreno.

Larghezza del rilevato

La larghezza del rilevato arginale $L'=L/\Omega$ è senza dubbio l'elemento più importante sul quale si possa agire nella verifica dei rilevati arginali al sifonamento. Per i rilevati omogenei è infatti proprio la larghezza che determina la lunghezza del percorso di filtrazione da cui dipende la dissipazione del carico idraulico.

Pendenza media dei paramenti

Paramento di monte

Nella determinazione della pendenza media da associare al paramento di monte si è tenuto conto degli schemi di predimensionamento riscontrati in letteratura. In particolare vengono indicate, come scarpa media verso fiume, una pendenza di 1:2 (Da Deppo et al., 1995). Altri autori (Linsley et al., 1992) suggeriscono analogamente pendenze che variano da 1:3 a 1:5 in relazione alle caratteristiche dei materiali utilizzati.

A parità di larghezza del rilevato, diminuire la pendenza del paramento di monte porta, in generale, ad un incremento dei valori del gradiente idraulico misurato al piede del rilevato lato campagna, a causa della minor lunghezza del percorso di filtrazione all'interno del rilevato stesso. Prove esaurienti di questo fenomeno sono state ottenute variando la pendenza del paramento di monte da 1:2 a 1:3 per la coppia di materiali selezionati. Per entrambe le tessiture considerate, si sono rilevati incrementi del gradiente idraulico adimensionale calcolato al piede di valle del rilevato che raggiungono il 10% per le configurazioni caratterizzate da bassi valori di L' . All'aumentare della larghezza L' , il moto si sviluppa principalmente nella fondazione e la componente satura diventa predominante. Questo fa sì che l'influenza della pendenza del paramento di monte diminuisca all'aumentare della larghezza del rilevato e, a parità di larghezza, all'aumentare dello spessore dello strato permeabile di base H_0' . Per realizzare pendenze inferiori a quelle di prova senza ridurre il

livello di sicurezza in termini di quota arginale, occorrerebbe aumentare la larghezza del rilevato. In tal caso, l'accorciamento del percorso di filtrazione dovuto alla diminuzione della pendenza verrebbe ad essere compensato dall'incremento della larghezza del rilevato stesso.

Paramento di valle

Dal punto di vista idraulico, la scelta della pendenza media del paramento di valle è dettata essenzialmente dalla necessità di evitare la formazione della sorgente sospesa. Le norme di buona tecnica riferite ad “un antico ed affidabile criterio, apprezzato ed applicato dal Corpo del Genio Civile del Ministero dei Lavori Pubblici è quello di assumere e di ricoprire con un rilevato, una ipotetica linea di infiltrazione con pendenza di 1:5;1:6 a partire, a fiume, dalla quota di massima piena” (Da Deppo et al., 1995). Gli schemi di predimensionamento proposti dagli stessi autori suggeriscono l'adozione di una pendenza media del paramento di valle da 1:4 ad 1:6. Le diverse simulazioni, effettuate per la coppia di valori 1:4 e 1:5, hanno mostrato, per entrambe le tessiture di prova, una bassa influenza di questo parametro sui gradienti idraulici adimensionali misurati al piede del rilevato lato campagna. Per tale ragione, come valore della pendenza media del paramento di valle si è scelto 1:5, che è il valore medio di predimensionamento suggerito in letteratura.

Spessore dello strato permeabile di base

Lo spessore dello strato permeabile di base H'_0 condiziona notevolmente le modalità del trasferimento della sovrappressione tra monte e valle, controllandone l'evoluzione nella zona satura. Infatti, il moto di filtrazione si sviluppa tanto nel rilevato, con modalità prevalente non satura, quanto al di sotto di esso, in condizione di completa saturazione. La componente satura trasferisce rapidamente la sovrappressione, diminuita dalle perdite di carico, con un effetto a “pistone”. L'importanza di questo parametro diventa dunque rilevante al fine della determinazione del gradiente idraulico misurato al piede di valle del rilevato, quando il campo del moto si sviluppa prevalentemente nella fondazione. Ciò accade per rilevati larghi, in cui la saturazione del rilevato è di tipo corticale, confinata alla zona in prossimità del paramento di monte. Nel caso di rilevati stretti, caratterizzati da bassi valori di L' , l'influenza di H'_0 diminuisce, e tende ad annullarsi per valori di $L' \leq 50$, quando le curve inviluppo dei massimi si schiacciano, quasi ad indicare l'esistenza di una curva limite, indipendente da H'_0 (figure 4 e 5). Tale effetto si verifica in tutti i casi esaminati ed in modo ancor più evidente, a parità di classe tessiturale, nelle configurazioni caratterizzate da bassi valori di h_0 , in cui assume maggior importanza il trasferimento del carico nella fascia non satura.

Parametro α'

Il parametro α' influenza l'andamento del moto dell'acqua all'interno della zona non satura. Esso consente di effettuare una stima di quale delle due modalità di trasferimento del carico da monte a valle, satura o non satura, sia predominante nel caso in esame. Nella zona non satura, infatti, si può pensare ad un'altezza che dia una misura del contributo del carico capillare al moto dell'acqua. Questa altezza viene qui indicata con il nome di *altezza efficace*, h_e , proporzionale ad $1/\alpha$ (figura 1). Valori elevati di α rappresentano mezzi a tessitura grossolana, come le sabbie, per i quali è sufficiente una piccola depressione per permettere la rientrata dell'aria nel mezzo saturo. Ne deriva

che in terreni a tessitura prevalentemente sabbiosa il contributo al moto, dovuto alla fascia non satura, è minore di quanto accade nei suoli a tessitura fine.

In particolare α' , pari al prodotto tra il parametro di Van Genuchten, α , e l'altezza di massima piena, h_0 , è una misura del rapporto tra l'altezza di massima piena e l'altezza efficace h_e :

$$\alpha' = \alpha \cdot h_0 = \frac{h_0}{h_e} \quad (9)$$

Poiché i valori di α sono noti in letteratura in funzione delle caratteristiche dei terreni, la variazione di α' , a parità di classe tessiturale prescelta, è dovuta alla variazione di h_0 . Per una classe tessiturale, aumentare α' vuol dire aumentare h_0 e quindi diminuire l'influenza della componente non satura allo sviluppo del moto. Pertanto, nelle simulazioni in cui il trasferimento della sovrappressione da monte a valle è dovuto essenzialmente alla componente non satura, si osservano valori più elevati del gradiente idraulico adimensionale per valori bassi di α' , che tengono conto di un'altezza efficace maggiore (figura 6a).

Questo è il caso dei rilevati stretti $L' \leq 50$ e, a parità di larghezza, dei rilevati con un piccolo spessore dello strato permeabile di base, ossia un basso valore di H_0' . Allo stesso tempo, a parità di h_0 , si può confrontare il comportamento di classi tessiturali differenti, cioè caratterizzate da valori diversi dei parametri di Van Genuchten, come mostra la figura 6b, in cui, per le classi tessiturali argilla sabbiosa e limo sabbioso, sono indicate le curve inviluppo dei massimi, relative ad una delle configurazioni più sensibili al contributo del flusso non saturo, caratterizzata dal valore $H_0' = 30$ dello strato permeabile di base, a parità di h_0 , assunto, in questo esempio, unitario.

Poiché h_0 è costante, la variazione di α' è attribuibile al valore caratteristico dei parametri di Van Genuchten, ed in particolare ad $\alpha = 1/h_e$. Anche in questo caso, nelle simulazioni caratterizzate da rilevati stretti (basso valore di L') e strato permeabile di base poco spesso (basso valore di H_0'), si registrano valori del gradiente del carico adimensionale maggiori per la classe tessiturale che presenta un valore più basso di α' . Da quanto detto si può dedurre che, per valori di α' crescenti, siano essi dovuti alla tipologia di terreno, o alle caratteristiche della piena, ci si avvicina alle condizioni in cui si può trascurare la zona non satura.

Sviluppo di abachi e formule speditive per la verifica del sifonamento

Nota l'influenza dei diversi parametri sullo sviluppo del moto, ne è stato definito un insieme minimo, tale da permettere la descrizione di un numero di configurazioni geometriche, di classi tessiturali e di idrogrammi di piena in alveo tali da poter essere considerate sufficientemente esaustive per la comprensione del fenomeno. Sono stati scelti: un valore per la pendenza media del paramento di monte 1:3, un valore per la pendenza media del paramento di valle 1:5, due classi tessiturali (argilla sabbiosa e limo sabbioso) e tre valori dell'altezza massima della piena in alveo h_0 (1, 5 e 10 m).

I risultati dello studio sono presentati con una serie di abachi, utili al progetto e alla verifica speditiva al sifonamento, delle sezioni arginali, individuati dalla coppia di pendenze per i paramenti, dai valori di α' e β , che individuano la classe tessiturale utilizzata, e dall'entità della piena transitante. In tali abachi sono riportate le curve inviluppo dei massimi valori del gradiente

adimensionale registrato al piede di valle del rilevato. Sull'asse delle ascisse è riportata la lunghezza adimensionale L' e sulle ordinate i valori massimi del gradiente idraulico adimensionale. Le diverse curve rappresentate su ciascun abaco sono caratterizzate da un determinato valore dello spessore dello strato permeabile di base H_0' (figure 5 e 6). Analizzando gli abachi, si possono riscontrare gli effetti dell'influenza dei parametri che caratterizzano le diverse configurazioni arginali. Per entrambe le tessiture di prova, il gradiente adimensionalizzato registrato al piede assume i valori massimi per le sezioni più strette $L' \leq 50$, con un'accentuazione nei casi caratterizzati da bassi valori di h_0 , casi in cui il trasferimento del carico idraulico nella zona non satura assume un'importanza rilevante. Inoltre, in tutti gli abachi le curve tendono a schiacciarsi per i rilevati stretti, con $L' \leq 50$, mostrando quale sia, in tali casi, il meccanismo prevalente di trasferimento del carico e confermando il fatto che non sia lecito trascurare la presenza della fascia non satura ai fini della valutazione del fattore di sicurezza.

Per utilizzare gli abachi in fase progettuale si adotta preventivamente un valore del fattore di sicurezza, compatibile con le buone norme progettuali riscontrabili in letteratura ed con le normative vigenti. Poiché il gradiente in uscita dal terreno è determinato localmente, si può ritenere accettabile un valore di F_s compreso tra 2 e 2,5, o poco superiore.

Si assume, quindi, la tipologia di terreno utilizzato per la costruzione del rilevato, determinandone le caratteristiche tessiturali, la porosità, il peso di volume e tutte le proprietà indici necessarie alla determinazione del gradiente idraulico critico per quel determinato terreno. Tale valore può essere determinato tramite la ben nota relazione

$$J_{crit} = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) (1 - n) \quad (10)$$

dove γ_s è il peso di volume della fase solida, γ_w è il peso di volume dell'acqua e n è la porosità del mezzo. Conoscendo le caratteristiche della piena di progetto, si calcola il valore del gruppo dimensionale

$$\Omega = \sqrt{\frac{K_s h_0 T}{\vartheta_s - \vartheta_r}} \quad (11)$$

Il massimo gradiente idraulico adimensionale ammesso al piede del rilevato

$$J'_{z,max} = J_{crit} \frac{\Omega}{h_0} \quad (12)$$

costituisce il valore di ingresso, sull'asse delle ordinate dell'abaco relativo alla configurazione di progetto. Contestualmente, noto lo spessore dello strato permeabile di base H_0 , si determina $H_0' = H_0 / \Omega$, parametro con il quale s'individua la curva relativa alla configurazione in esame e quindi il valore di L' .

Convertendo il valore del parametro progettuale L' , nella corrispondente grandezza di progetto $L = L' \Omega$, si ottiene la minima larghezza della sezione che garantisce il prefissato del coefficiente di sicurezza.

Nella fase di verifica, nota la sezione arginale, ossia le caratteristiche geometriche del rilevato e quelle tessiturali del materiale che lo costituisce e del terreno di fondazione, nonché le caratteristiche in periodo ed altezza dell'onda di piena di progetto, si può individuare, tra i diversi abachi proposti, quello relativo ai parametri suddetti e quindi verificare se la sezione arginale possa essere o meno interessata dal fenomeno del sifonamento. In primo luogo si determina il valore del

gruppo dimensionale Ω e, conoscendo la larghezza effettiva della sezione L , il valore adimensionale corrispondente L' . Allo stesso modo si procede per lo spessore dello strato permeabile di base H_0 , determinando corrispondente valore adimensionale H_0' . Si calcola, quindi, il valore J'_{zmax} da cui, in base alle caratteristiche della sezione in esame si calcola J_{zmax} . Note, infine, le caratteristiche del materiale, si calcolano il valore del gradiente idraulico critico, ed coefficiente di sicurezza della sezione al sifonamento F_s .

Esempio applicativo

Si supponga di voler verificare una sezione arginale di larghezza $L=21\text{ m}$, con pendenza media del paramento di monte $1:3$ e di quello di valle $1:5$, con una fondazione costituita da uno strato permeabile di spessore $H_0 = 35\text{ m}$.

L'onda di piena sia caratterizzata da un'altezza massima $h_0 = 3\text{ m}$ ed un periodo $T = 5$ ore. Il terreno scelto per la realizzazione del rilevato appartenga alla classe tessiturale limo sabbioso, con permeabilità a saturazione $K_s = 0,0371\text{ m/h}$, contenuto d'umidità a saturazione $\vartheta_s = 0,41$, contenuto di umidità di ritenzione $\vartheta_r = 0,065$. Dalle caratteristiche geometriche e tessiturali, nonché dalle caratteristiche dell'onda di piena si determina, tramite la (7), il valore di $\Omega = 1,27$, caratteristico del caso in esame. Ne consegue che $L' = 16,51$; $H_0' = 27,55$. Entrando nell'abaco con il valore L' s'individuano, sull'asse delle ascisse, i valori dei gradienti idraulici adimensionali al piede del rilevato per le curve con valori di H_0' contigui al valore di verifica, nella fattispecie $H_0' = 10$ e $H_0' = 30$. Ipotizzando una variazione lineare di H_0' , si ottiene il valore del gradiente idraulico massimo relativo alla configurazione di interesse pari a $J'_{max} = 0,218$. Riportando tale valore al caso dimensionale si ha $J_{max} = 0,515$. Calcolando, infine, il valore del coefficiente di sicurezza $F_s = 1,96$, si verifica che questo è inferiore al valore di $2,5$, per cui la sezione non è verificata, dove per J_{crit} si è assunto il valore unitario di letteratura.

Si voglia quindi determinare il valore minimo della larghezza della sezione tale da garantire un coefficiente di sicurezza $F_s = 2,5$. Ciò implica che il gradiente massimo ammesso al piede del rilevato sia pari a $J_{max} = 0,4$, che corrisponde ad un valore del gradiente massimo adimensionale $J'_{max} = 0,169$. Con tale valore si entra sull'asse delle ordinate dell'abaco di progetto, si determina un intervallo di valori di L' compreso tra le curve $H_0' = 10$ ed $H_0' = 30$ e, come indicato precedentemente, si determina il valore di L' in corrispondenza ad $H_0' = 27$. Ne risulta $L'_{min} = 22,9$, che in forma dimensionale fornisce $L_{min} = 29,08\text{ m}$.

Conclusioni

Lo studio del moto di filtrazione che si sviluppa nei rilevati arginali al passaggio di una piena in alveo ha messo in evidenza il contributo del carico capillare alla caratterizzazione del moto e al verificarsi del sifonamento. In particolare, dai risultati ottenuti nelle numerose simulazioni è emerso che il trasferimento delle sovrappressioni da monte a valle dell'argine è influenzato da due componenti, quella non satura, che influenza lo sviluppo del moto nel corpo del rilevato e quella satura che governa il moto filtrante in fondazione.

Tramite la definizione dell'altezza efficace h_e , e valutando l'influenza del parametro $\alpha' = h_o/h_e$, si è potuto stimare il contributo della zona non satura sul moto di filtrazione. Si può ritenere che questa zona non contribuisce più in misura significativa al moto quando le altezze dell'onda di piena sono superiori di diversi ordini di grandezza a quelle che realisticamente si presentano in natura. Questo risultato implica che le soluzioni normalmente adottate nella pratica applicativa, le quali non tengono conto del contributo del carico capillare, possono non risultare cautelative.

Lo studio dell'influenza che i parametri geometrici e tessiturali del complesso rilevato-fondazione e le caratteristiche della piena hanno sullo sviluppo del moto filtrante permette di valutare quali siano le condizioni più gravose per il verificarsi del fenomeno. In particolare, il sifonamento interessa rilevati caratterizzati da bassi valori di L' . In questa categoria rientrano sia le sezioni strette (L piccolo) che vanno in crisi per piene intense e di breve durata, rappresentate da bassi valori di Ω , sia le sezioni di medie dimensioni, ma sottoposte a piene di lunga durata, individuate da valori elevati di Ω . In tali condizioni si è potuto osservare che il fenomeno è indipendente dal parametro H'_o , che tiene conto dello spessore dello strato permeabile di base, il che implica che il trasferimento delle sovrappressioni avviene prevalentemente nel rilevato.

Si è riscontrato un ritardo del massimo dei gradienti misurati al piede del rilevato, rispetto al picco dell'idrogramma. Si è visto, inoltre, le condizioni iniziali di carico e di saturazione si ristabiliscono gradualmente, con l'esaurimento della piena in alveo. Il ritardo con cui si torna ai valori iniziali può essere stimato in un ordine di grandezza pari a circa $10 T$, cioè 10 volte il periodo dell'onda di piena. Ciò può rendere l'argine sensibile al sifonamento in caso di piene con picchi multipli, in cui i picchi secondari, anche se di entità minore, vanno ad agire sul complesso rilevato fondazione ancora interessato dall'esaurimento del picco precedente. L'analisi della risposta del sistema rilevato-fondazioni sollecitato da una piena caratterizzata dal susseguirsi di picchi temporalmente ravvicinati potrebbe essere oggetto d'una estensione della ricerca.

Infine dalle ricerche preliminari, in cui si è fatto particolare riferimento alla letteratura tecnica, si è riscontrato come configurazioni molto favorevoli allo sviluppo del fenomeno del sifonamento si hanno quando viene utilizzato, per la realizzazione del rilevato, un terreno con caratteristiche di permeabilità molto differenti da quelle degli strati di fondazione. Ulteriore sviluppo del presente studio è dunque legato alla possibilità di simulare tale contrasto di permeabilità, tra rilevato e fondazione valutare quali configurazioni siano più sensibili al fenomeno del sifonamento.

BIBLIOGRAFIA

AA.VV., “*Design of Small Dams*” Water Resources Publication – Third Edition – United States Department of the Interior Bureau of Reclamation 1987

Bear J., “*Dynamics of Fluid in Porous Media*” Dover Publication, New York 1972

Bowles D.S., O'Connell P.E., “*Recent Advance in the Modelling of Hydrology Systems*” Kluwer Academic Publishers, Netherlands 1991

Carsel R.F., Parrish R.S., “*Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics*” Water Resources Research, **24**, 755-769 1988

Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W., “*Applied Hydrology*” McGraw-Hill International Editions 1988

- Colombo P., Colleselli F., “*Elementi di geotecnica*” Ed. Zanichelli 1998
- Cremonesi C., “*Algoritmi di calcolo numerico*” Città Studi Edizioni 1997
- Da Deppo L., Datei C., Saladin P., “*Sistemazione dei corsi d’acqua*” Edizioni Libreria Cortina Padova 1995
- Delleur, Jacques W., “*The Handbook of Groundwater Engineering*” GRC Press 1999
- Department of the Army, “*Design and Construction of Levees*” U.S. Army Corps of Engineers 2000
- Deangelis M.L., Maione U., Morgante S., Tanda M.G., “*Studio della falda all’interno di un argine in occasione del transito di una piena fluviale*” XXV Convegno di Idraulica e Costruzioni idrauliche, in Atti-Volume I, Torino 16-18 settembre 1996
- Fontana N., “*Seepage Phenomena in river levees two dimensional flood wave propagation resulting from a levee river*” Perugia 2000 – International Symposium 10 Years of the IDNDR
- Giugni M., N. Fontana, “*Sulla determinazione della linea d’infiltrazione all’interno di un argine fluviale*” L’Acqua n° 5, 1999
- Haely R.W., Roan A.D., *Documentation of computer program VS2DH for simulating energy transport in variably saturated porous media – modification of the U.S. Geological Survey’s Computer Program VS2DT*. U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 96 – 4230, 36p. 1996
- Hsieh, P.A., Wingle, William, and Healy, R.W., , *VS2DI--A graphical software package for simulating fluid flow and solute or energy transport in variably saturated porous media: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4130*, p 16. USGS WRIR 99-4130, 2000.
- Lappala E.G., Healy R.W., Weeks E.P. , “*Documentation of computer program VS2D to solve the equation of fluid flow in variably saturated porous media*” U.S. Geological Survey, Water Resources Investigation Report, 83 – 4099, 184p. 1987
- Lambe W. T., Whitman R. V., “*Meccanica dei terreni*” Dario Flaccovio Editore 1997
- Linsley R.K., Franzini J.B., Freyberg D.L., Tchobanglous G., “*Water Resources Engineering*” McGraw Hill International, p. 754 -757 1992
- Marchi E., “*Un criterio per la verifica alla filtrazione delle arginature in terra*” Giornale del Genio Civile, giugno 1957.
- Marchi E., “*Sulla filtrazione attraverso gli argini fluviali*” Atti del VII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Palermo. 1961
- Mualem, Y.. *A new model for predicting the hydraulic conductivity unsaturated porous media*. Water Resources Research, 12: 513-522. 1976 a

Mualem, Y. *A catalogue of hydraulic properties of unsaturated soils*. Reserch Project n. 442 Technion, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel. 1976 b

Neuman S.P., Whitherspoon P.A., “*Analysis of nonsteady flow with a free surface using the finite element method*” *Water Resources Research*, 7 n°3, 611-623. 1971

Ojha, Singh , Adrian “*Determination of critical head in soil piping* ” *Journal of Hydraulic Engineering ASCE J* 2003 Vol129 n°7. 2003

Richards, L. A. , *Capillary conduction of liquids through porous mediums*, *Physics*, vol. 1, pp. 318-333, 1931

Supino G., “*La linea di filtrazione negli argini e nelle dighe in terra*” *Atti del V Convegno regionale dell'A.I.I.* 1955

USDA, U.S. Department of Agriculture (Soil Survey Laboratory Staff, 1992)

Vanapalli S.K., Sillers W.S., Fredlund M.D., “*The meaning and relevance of residual state to unsaturated soils*” 51st Canadian Geotechnical Conference, Edmonton, Alberta 1998

Van Genuchten M. Th., “*A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil*” *Soil Science Society of America Journal*, 44 892 – 898 1980

Van Genuchten M. Th., “*On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soil*” *Ann. Geophys*, 3 615 – 628 1985

Fig 1 :SCHEMA ARGINALE DI PROVA

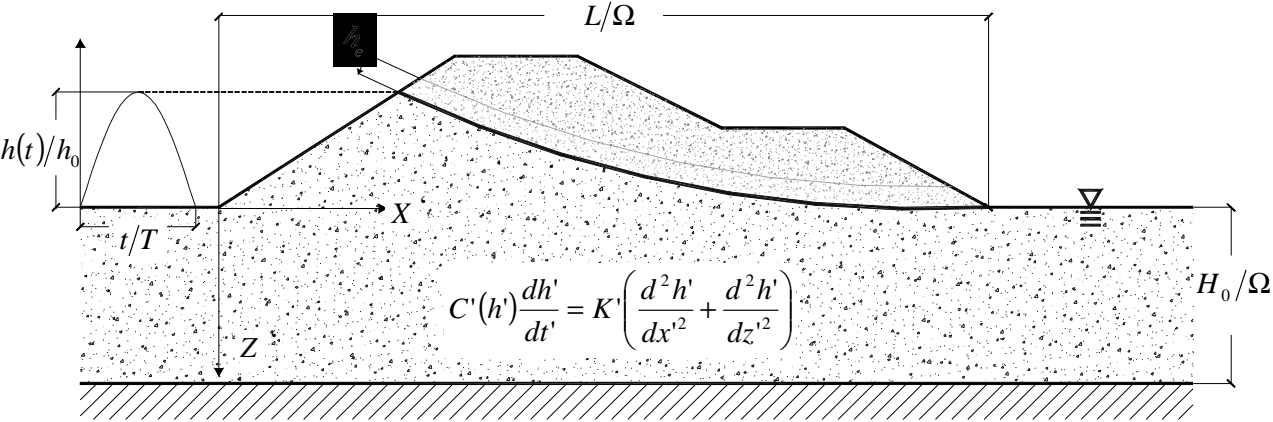
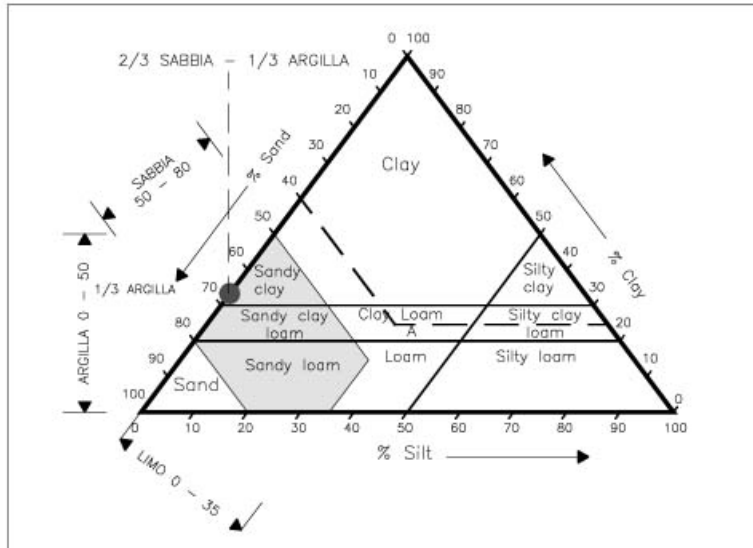


Fig 2 : INDIVIDUAZIONE DELLE CLASSI TESSITURALI DI INTERESSE SU TRIANGOLO DELLA CLASSIFICAZIONE U.S.D.A.



**Fig 3 : GRADIENTE VERTICALE AL PIEDE DEL RILEVATO LATO CAMPAGNA
TESSITURA:SANDY LOAM; $H_0'=10$; $L'=18$; $h_0=1$**

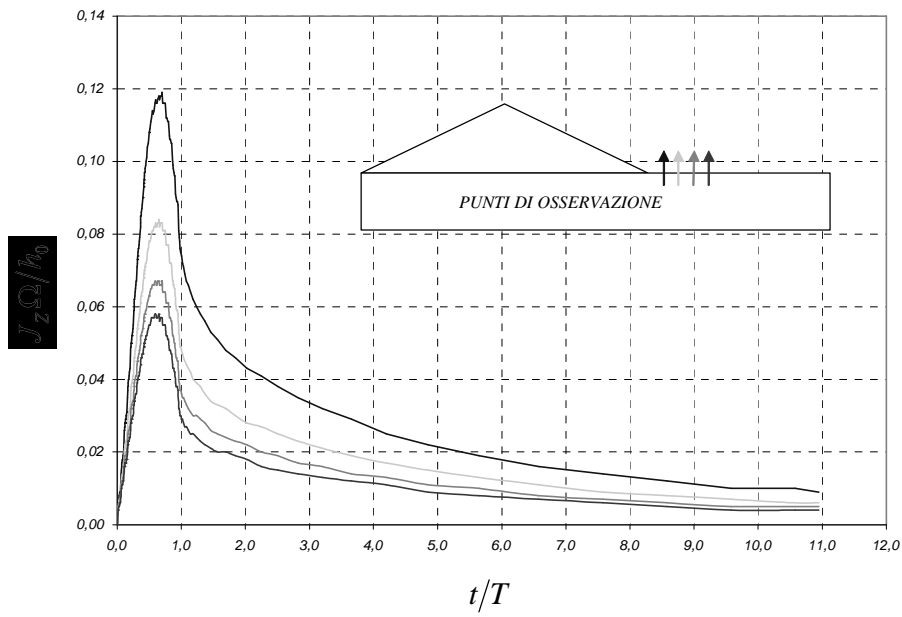
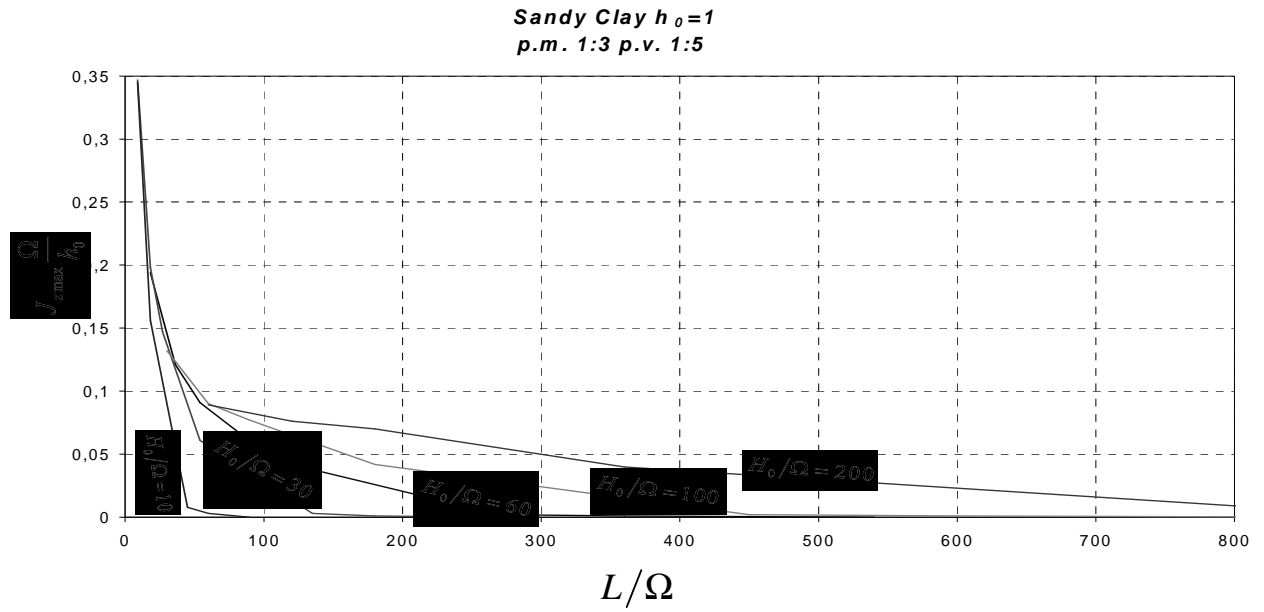
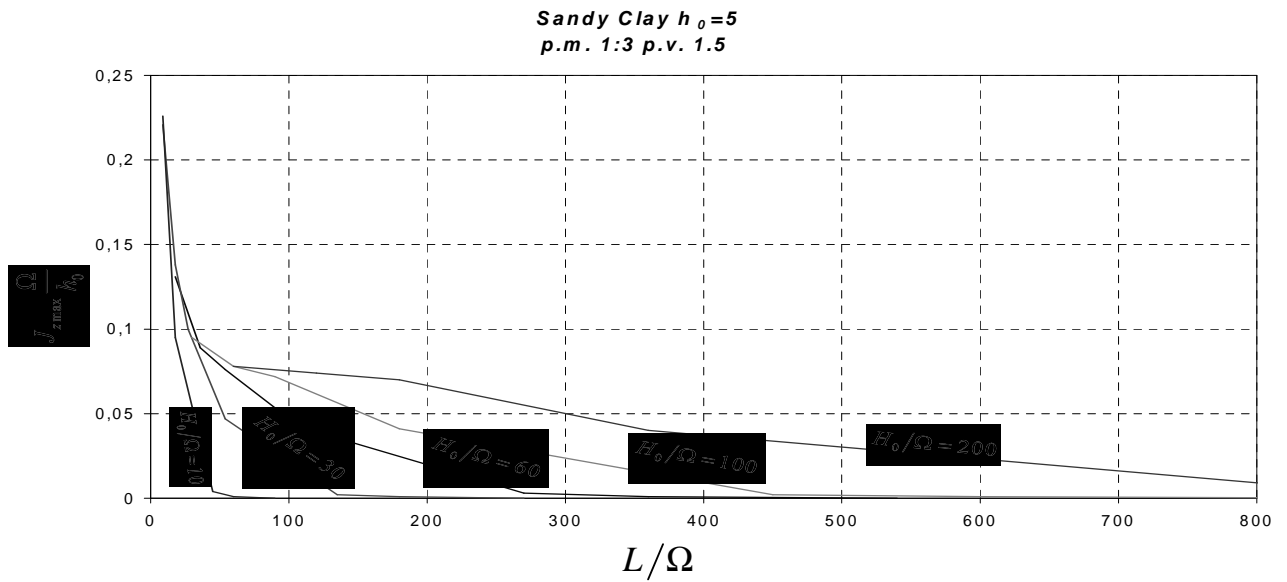


FIGURA 4 : ABACI PER LA VERIFICA DEI RILEVATI ARGINALI AL SIFONAMENTO SANDY CLAY

a)



b)



c)

Sandy clay $h_0=10$
p.m 1:3 p.v 1:5

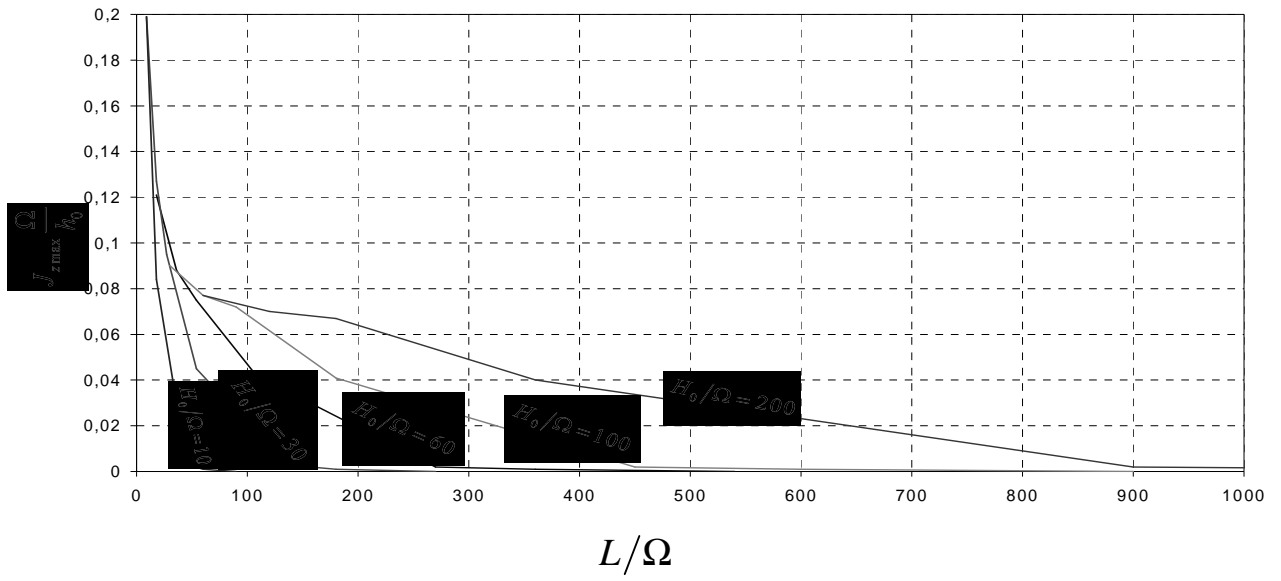
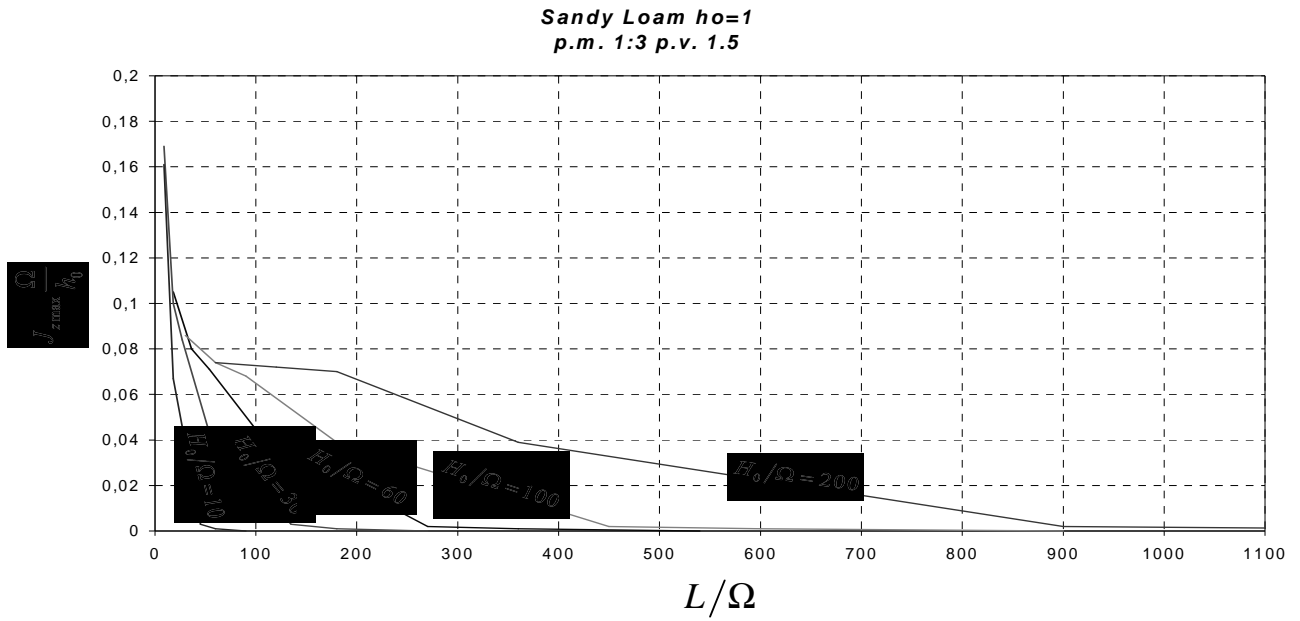
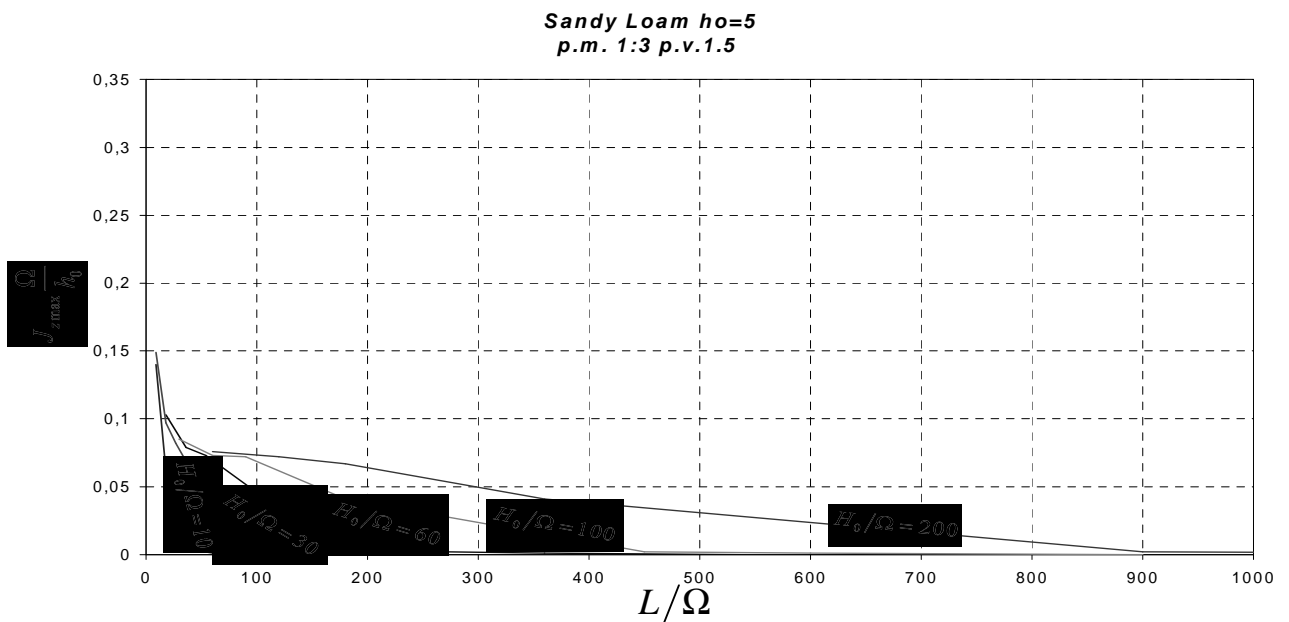


FIGURA 5 : ABACHI PER LA VERIFICA DEI RILEVATI ARGINALI AL SIFONAMENTO SANDY LOAM

a)



b)



c)

Sandy Loam $h_0=10$
p.m. 1:3 p.v. 1.5

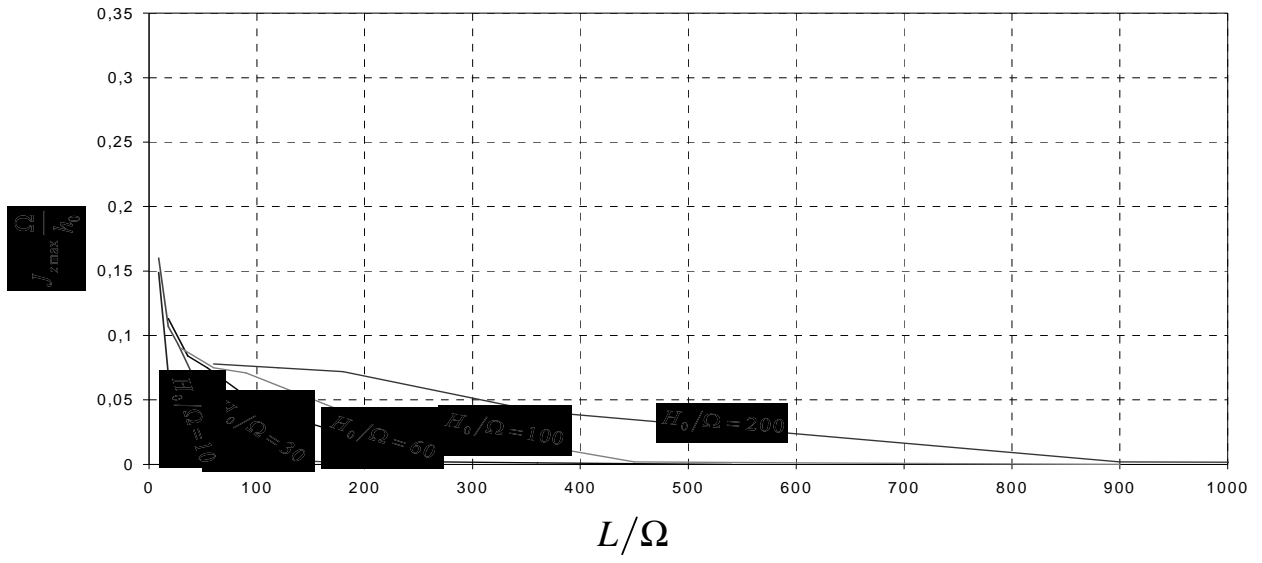
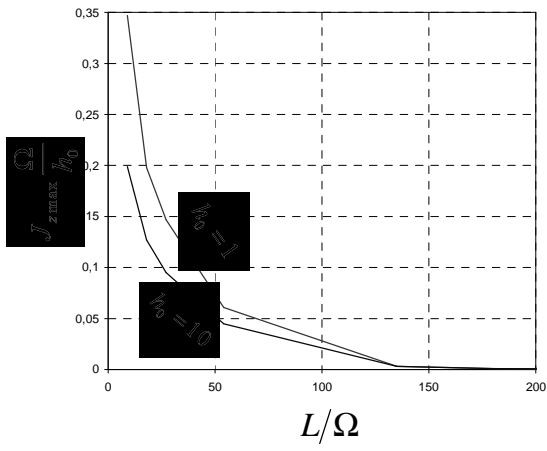
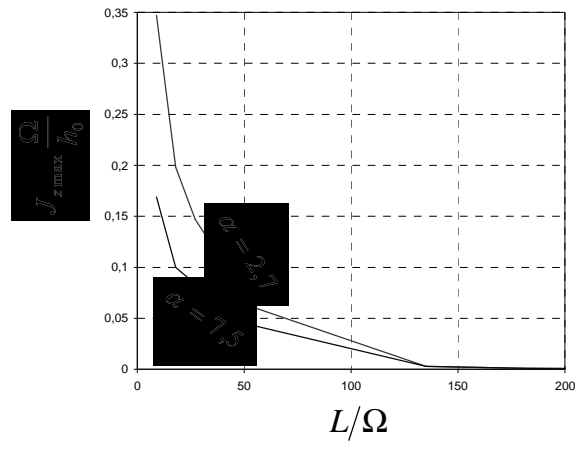


Fig 6: INFLUENZA DEL PARAMETRO α'



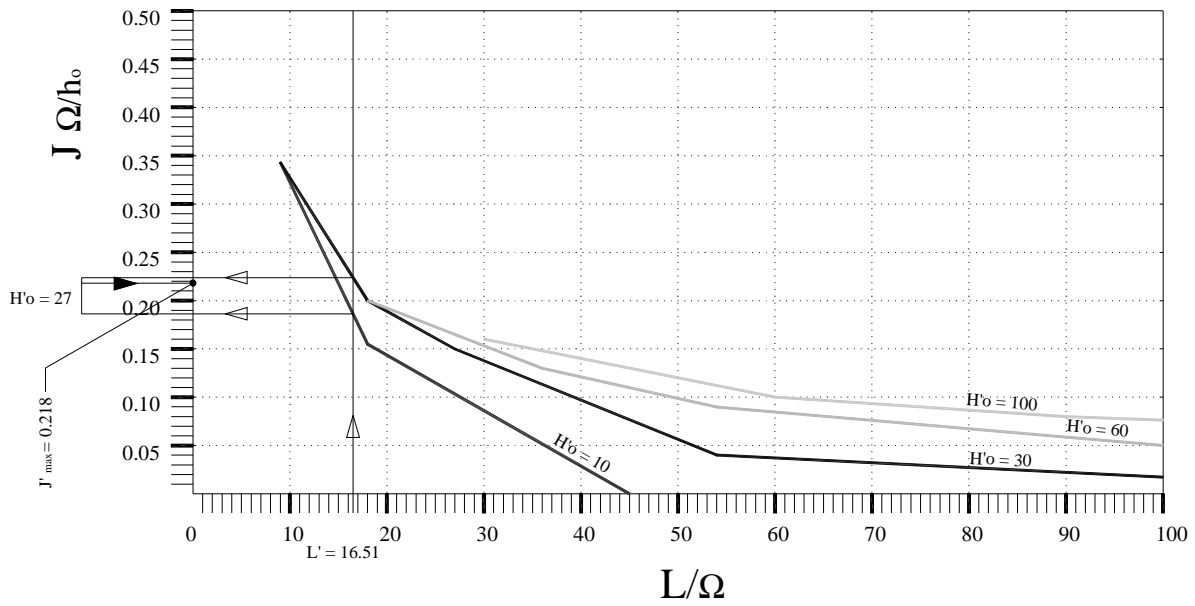
a) Influenza del parametro α' al variare di h_0
 ($\alpha=2,7$ $\beta=1,23$ $H_0'=30$)



b) Influenza del parametro α' al variare di α , ($h_0=1$, $H_0'=30$)

FIG 7 ESEMPIO APPLICATIVO

a) FASE DI VERIFICA



b) FASE DI PROGETTO

