

STUDIO DELLE STRUTTURE IDROGEOLOGICHE CRITICHE PER LA STABILITA' DELLE RIPE DELLE VALLI ALLUVIONALI

A cura di V. Francani , L. Colombo e D. Cremonesi

Vincenzo.francani@polimi.it

loris.colombo@polimi.it

daniele.cremonesi@mail.polimi.it

Indice

1	PREMESSA.....	2
2	INTRODUZIONE.....	2
3	STUDI PRECEDENTI.....	3
4	IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI ANALITICI E NUMERICI.....	3
5	STUDIO DI POSSIBILI STRUTTURE NELLE PIANURE ALLUVIONALI.....	4
5.1	CASO 1: GALLERIE A MAGGIOR PERMEABILITA' DISPOSTE A FORMA DI "T" CON FIUME A CARICO COSTANTE.....	5
5.2	CASO 2 :GALLERIE A MAGGIOR PERMEABILITA' DISPOSTE A FORMA DI "T" CON FIUME A CARICO VARIABILE.....	6
5.3	CASO 3: GALLERIE AD ELEVATA PERMEABILITA' E DIVERSO SPESSORE A FORMA DI "T" CON FIUME A CARICO COSTANTE.....	8
5.4	CASO 4: GALLERIE A MAGGIOR PERMEABILITA' CON LENTE DISTACCATA DALLA ZONA A MONTE.....	10
5.5	CASO 5: GALLERIE A MAGGIOR PERMEABILITA' A DIVERSE DIMENSIONI.....	12
5.6	CASO 6: GALLERIE A MAGGIOR PERMEABILITA' INTERSECANTI A VALLE A FORMA DI "V".....	13
5.7	CASO 7: DEPOSITI ALLUVIONALI O FLUVIOGLACIALI POSTI IN SOMMITA' DI UN PENDIO.....	14
6	RELAZIONI TRA PARAMETRI ACQUIFERO E L'ANDAMENTO DEI GRADIENTI:.....	16
7	CONCLUSIONI.....	17
8	BIBLIOGRAFIA.....	18

1 PREMESSA

La presenza di lenti a maggior permeabilità all'interno di una matrice argillosa può recare fenomeni di piping, che sono cause predisponenti per fenomeni di franamento. Esistono a tal proposito in natura, soprattutto nelle pianure delle valli alluvionali lombarde, diverse strutture che possono dare origine a piezometrie critiche e di difficile interpretazione.

Lo studio vuole analizzare queste particolari strutture al fine di spiegare il comportamento piezometrico in corrispondenza delle stesse, tale da agevolare i possibili interventi necessari per i problemi più pratici.

A tal proposito, è stato fatto un confronto dei gradienti calcolati in presenza di diverse strutture (lenti di diverse forme perpendicolari ad un recapito, due lenti congiungenti a monte di un recapito, depositi alluvionali in cima ad un versante) tra un modello analitico operante nel campo complesso e un modello numerico quale Modflow. I risultati tra i due modelli risultano convergenti e ben spiegano la dinamica piezometrica indotta dalle particolari strutture.

2 INTRODUZIONE

Lo studio per la dinamica dei corsi d'acqua non può prescindere dallo studio della stabilità delle ripe. In natura esistono numerose strutture geologiche particolari, che possono determinare gradienti idraulici superiori al valore critico del versante. In particolare, la presenza di lenti ghiaiose – sabbiose, immerse in versanti argillosi meno permeabili può generare scalzamenti al piede della ripa, causandone il franamento.

Questo tipo di strutture si trovano facilmente lungo versanti vallivi al cui piede scorre un corso d'acqua, che costituisce un recapito per le acque che scorrono nell'acquifero sovrastante. La lente ad alta permeabilità se perpendicolare e diretta verso il recapito di valle costituisce una via preferenziale per il flusso idrico, il quale, giunto al piede della lente stessa, al contatto con la zona meno permeabile, viene ostacolato nel suo percorso verso valle, e genera un gradiente idraulico superiore a quello critico.

La presenza di gradienti idraulici elevati contribuisce ad aumentare le probabilità di cedimento delle ripe fluviali, dal momento che esse sono zone già naturalmente sature, e sono già soggette a fenomeni di instabilità per via delle elevate pendenze e l'azione erosiva operata dai fenomeni di piena.

La presenza di elevati gradienti idraulici insieme all'aumento della velocità della corrente contribuisce, oltre ad aumentare l'instabilità di questa tipologia di terreni, a creare fenomeni di erosione sotterranea, altrimenti noti come piping.

Questo fenomeno consiste nella creazione, a causa dell'azione erosiva continua, di una ramificazione di gallerie di svariate dimensioni. Quando esse sono molto ravvicinate, il piping crea dei vuoti che possono portare al crollo dei terreni interposti.

Se si è in presenza di uno strato sabbioso drenante tra due livelli a più bassa permeabilità, che terminano proprio in corrispondenza di sponde fluviali oppure terrazzi morenici, la probabilità dell'insorgenza di piping è piuttosto elevata.

Il presente lavoro vuole illustrare quale sia l'influenza della forma e della dimensione delle lenti ad alta permeabilità sulle variazioni del gradiente idraulico, con lo scopo di individuare opportune forme di prevenzione dal rischio di instabilità della ripa,. Si è voluto anche studiare quale sia l'apporto di eventi meteorici consistenti nel causare fenomeni significati di instabilità delle ripe.

3 STUDI PRECEDENTI

Lo studio delle ripe fluviali risulta di enorme interesse sin dai primi anni 90. Infatti, Staiano et al. (1995) hanno studiato quali potevano essere i fattori recanti l'instabilità degli alvei e il rischio idraulico su un caso reale quale il Fiume Sieve

Successivamente, un grande contributo teorico per legare le variabili dominanti l'instabilità dei versanti, tra le quali i parametri idrogeologici della ripa e l'entità delle precipitazioni è stato fornito da Iverson e Richard (2000).

Negli anni successivi l'approccio alla difesa delle ripe si avvale di studi improntati all'analisi della dinamica degli alvei nei casi di particolare interesse. Ad esempio, si citano le indagini di Masetti et al. (2007).

Ai fini dello studio del fenomeno di erosione sotterranea, risultano di interesse i numerosi lavori eseguiti in seguito al collasso di arginature o di sbarramenti artificiali (Della Rossa et al., 2003; Bonomi et al., 2005). Alcuni autori (Crosta e Di Prisco, 2008), hanno ricostruito in modo esauriente l'evoluzione della stabilità di una ripa fluviale sulla base di un caso reale, descrivendo i fenomeni di erosione sotterranea e liquefazione che possono verificarsi in occasione delle piene accompagnate da forti precipitazioni. L'individuazione di diverse strutture geologiche critiche per l'insorgenza di fenomeni di instabilità dovuti a fenomeni di piping lungo le ripe fluviali (Colombo et al., 2011) ha permesso di individuare una semplice relazione che legasse la variazione del carico del fiume con il gradiente della ripa.

Per far fronte all'insorgenza di fenomeni di piping, è necessario mantenere la ripa quanto più drenata possibile mediante un sistema di drenaggio (Colombo et al., 2012), evitando quindi una variazione molto elevata dei carichi idraulici, responsabili dell'insorgenza di cadenti piezometriche molto elevate e non sostenibili dalle caratteristiche idrogeologiche di molte ripe fluviali.

4 IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI ANALITICI E NUMERICI

L'analisi delle strutture idrogeologiche è stato effettuato mediante un codice di calcolo analitico che opera nel campo complesso (GFlow - Haitjema Software, Haitjema, 1995). Tale software consente di rappresentare le strutture mediante elementi analitici quali "line-sinks", "inhomogeneities". Gli elementi analitici sono funzioni matematiche (reali o complesse) che rappresentano le strutture idrogeologiche in un modello di flusso. Ad esempio, il fiume può essere rappresentato come una linea spezzata che approssima l'andamento di esso e con le sue caratteristiche di carico, profondità, larghezza. La "line-sink" genera un potenziale e una funzione di flusso che sono rispettivamente la parte reale ed immaginaria del potenziale complesso generato dalla linea.

La parte reale è definita in funzione del carico idraulico ϕ misurato rispetto la base dell'acquifero e della conduttività idraulica k dell'acquifero. Sotto ipotesi di flusso confinato con H lo spessore dell'acquifero, il potenziale è definito come

$$\Phi = kH\phi - \frac{1}{2}kH^2 \quad (1.1)$$

Le equazioni differenziali implementate sono lineari sia nel caso confinato che non confinato.

Le "inhomogeneities" sono definite come domini interni al dominio dell'acquifero in cui la conduttività idraulica, la base dell'acquifero, il tasso di ricarica e la porosità possono essere

cambiate, rendendo il sistema nel suo complesso eterogeneo. Le linee poligonali non devono mai sovrapporsi tra di loro, ad eccezione di quando si deve impostare il tasso di ricarica dell'acquifero; tali linee rappresentano bene canali di depositi più permeabili che hanno solitamente una base differente e una ricarica dovuta alle precipitazioni.

Quando vengono definite gli elementi analitici è importante distinguere tra "campo vicino" e "campo lontano" dell'area modellizzata. Il "campo vicino" rappresenta l'area di interesse di studio mentre il "campo lontano" rappresenta l'area che circonda il campo vicino, e che contiene le grandezze che influenzano il dominio. Esso è in sostanza la condizione al contorno del modello. L'impostazione della griglia invece è del tutto simile ad un modello numerico, eccezion fatta per l'impostazione dei layer, che può essere fatta solo con le "inhomogeneities".

Al fine di confrontare i risultati ottenuti dal modello analitico, è stato effettuato un confronto con un modello numerico, GWVistas – Modflow (EMS – Environmental Modeling System, McDONALD, HARBAUGH, 1984).

Tale modello descrive il flusso idrico che transita nel sistema implementato mediante equazioni di bilancio in ognuna delle celle del modello, pur servendosi per alcuni elementi dello stesso principio analitico del modello GFlow.

5 STUDIO DI POSSIBILI STRUTTURE NELLE PIANURE ALLUVIONALI

L'acquifero modellato ben rappresenta quello presente nelle pianure alluvionali. Esso è in pressione a permeabilità medio – bassa (10^{-4} m/s), di spessore pari a 15 metri (da 85 m s.l.m. a 100 m s.l.m.) delimitato da un substrato roccioso. Le condizioni al contorno sono state imposte a monte, mediante una condizione a carico costante pari a 100 m s.l.m., mentre a valle il fiume è stato posto a carico costante pari a 94 m s.l.m. L'area di studio ha un'estensione di 500 * 500 metri, ed il gradiente idraulico tra monte e valle è pari all'1,2%.

Immediatamente a valle del carico di monte vi è una porzione sabbiosa ad elevata permeabilità, pari a 10^{-2} m/s di spessore pari a quello dell'acquifero. Questa zona a maggior permeabilità si estende per tutta la larghezza dell'acquifero, mentre si spinge mediamente 50 metri verso valle.

La rappresentazione modellistica dell'acquifero, pertanto, è quella nelle Figure 1a e 1b.

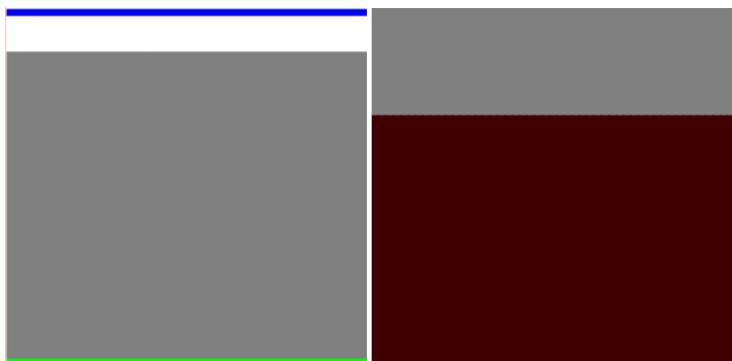


Figura 1 – (a – sinistra) Planimetria dell'acquifero: condizioni al contorno (blu e verde) e lente sabbiosa in bianco immersa in una matrice argillosa; (b – destra) Sezione del modello: in grigio l'acquifero ed in marrone il substrato impermeabile.

5.1 CASO 1: GALLERIE A MAGGIOR PERMEABILITA' DISPOSTE A FORMA DI "T" CON FIUME A CARICO COSTANTE

La presenza di gallerie a maggior permeabilità disposte come in Figura 2 possono essere assimilate nel modello come una grande "struttura a T" sezionando l'acquifero orizzontalmente: circa a metà della larghezza dell'acquifero, dalla zona di monte ad alta permeabilità si ha una lente parallela alla direzione del gradiente idraulico e perpendicolare al recapito di valle, fino a 50 metri dal fiume. La larghezza della lente è di 50 metri, mentre il suo spessore è pari a quello dell'intero acquifero.

La struttura è stata implementata nel modello analitico, ottenendo i risultati proposti nella Figura 2a.

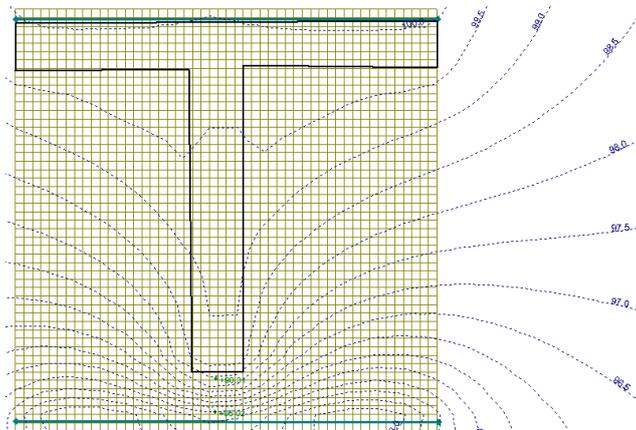


Figura 2a – Risultati ottenuti per la "struttura a T" nel modello analitico

Come confronto è stata implementata la stessa struttura anche nel modello numerico, ottenendo i carichi idraulici come in figura 2b.

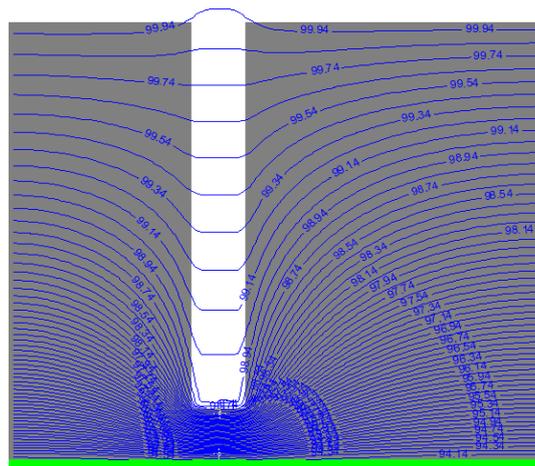


Figura 2b – Distribuzione dei carichi idraulici ottenuti con il modello numerico nella "struttura a T"

I risultati analitici paiono descrivere bene il sistema analizzato, sebbene vi siano alcune differenze con il modello numerico. Infatti, esse sono definite su un dominio indefinito, mentre nel modello numerico, esternamente alla griglia di discretizzazione, viene considerata una condizione di "no

flusso” dove l’acqua non può transitare, delimitando, di fatto, l’area. Il modello analitico, invece, estende il calcolo anche al di fuori della griglia di calcolo, non avendo alcuna condizione laterale.

Allo stesso modo, il modello numerico considera le condizioni di carico costante di monte e di valle come delle condizioni “al contorno”, oltre le quali non procede con il flusso idrico; le equazioni del modello analitico, invece, operando su un dominio indefinito, non considerano una condizione di carico imposto come “condizione al contorno”, ma semplicemente come “vincolo” che le soluzioni devono toccare, ma sul quale non devono necessariamente arrestarsi. Questo perché le condizioni al contorno, come precedentemente detto, sono considerate linee a “campo lontano” e non sono delle vere e proprie condizioni al contorno come in Modflow.

Questa differenza si riscontra nella diversa forma delle linee di flusso idrico, rappresentate nelle figure 2a e 2b.

La zona critica, che si può osservare in entrambi i modelli, risulta essere quella tra il piede della lente e il recapito. In questo spazio le linee del carico si stringono molto. Infatti dal momento che il passaggio da una zona ad alta permeabilità ad una zona a bassa permeabilità induce un repentino aumento idraulico delle velocità, poiché la diminuzione della permeabilità ostacola il transito del flusso idrico. A monte, invece, nella zona ad alta permeabilità, si ha un leggero gradiente negativo, che non influenza però la ripa limitrofa al fiume.

Nella Tabella 1 si riportano i risultati ottenuti calcolando il gradiente idraulico tra la fine della lente e il fiume.

Tabella 1 – Calcolo del gradiente idraulico a valle della lente: H_2(m) carico nei pressi della lente, H_1(m) carico nei pressi del fiume, d (m) distanza tra i due punti di misura e J(%) il gradiente idraulico

	MODELLO NUMERICO	MODELLO ANALITICO
d [m]	40	40
H_2 [m s.l.m.]	98.50	98.31
H_1 [m s.l.m.]	94.66	95.02
J [%]	9.60	8.23

Come si evince dai risultati ottenuti, le equazioni analitiche, pur con le limitazioni introdotte in precedenza, paiono descrivere correttamente, anche dal punto di vista numerico, il comportamento del flusso.

Si rileva, al piede della lente ad alta permeabilità, un gradiente idraulico prossimo al 10%, un valore estremamente critico per la stabilità del terreno e della ripa fluviale.

5.2 CASO 2 :GALLERIE A MAGGIOR PERMEABILITA’ DISPOSTE A FORMA DI “T” CON FIUME A CARICO VARIABILE

Si è voluto vedere quale sia il comportamento del gradiente lungo la ripa ed in presenza della lente, se ci fosse un disturbo al fiume, ad esempio un evento di piena particolarmente violento e concentrato, o “flash flood”. L’idrogramma studiato è riportato nella s Figura 3. Esso, ha due picchi di piena, che producono un innalzamento del livello di circa 2.5 metri durante la prima fase, e di 2 metri durante la seconda, smorzandosi poi nel seguito. La durata totale dell’evento è di circa 10

giorni. Esso induce sul carico idraulico delle oscillazioni di livello calcolabili mediante la relazione di Pinder e Cooper (1959), già applicata in vari studi di Colombo et al. (2011 - 2012).

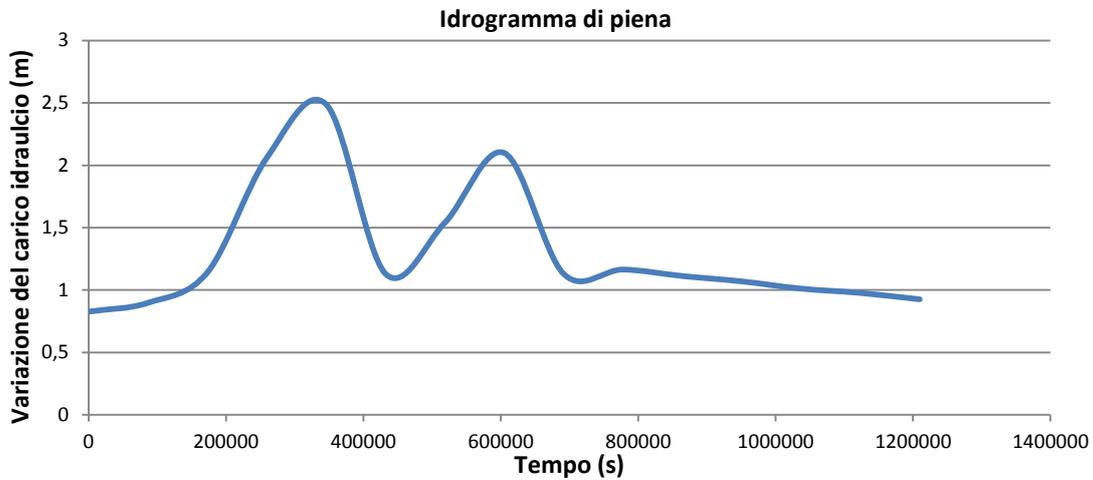


Figura 3a – Idrogramma di piena che insiste sul fiume

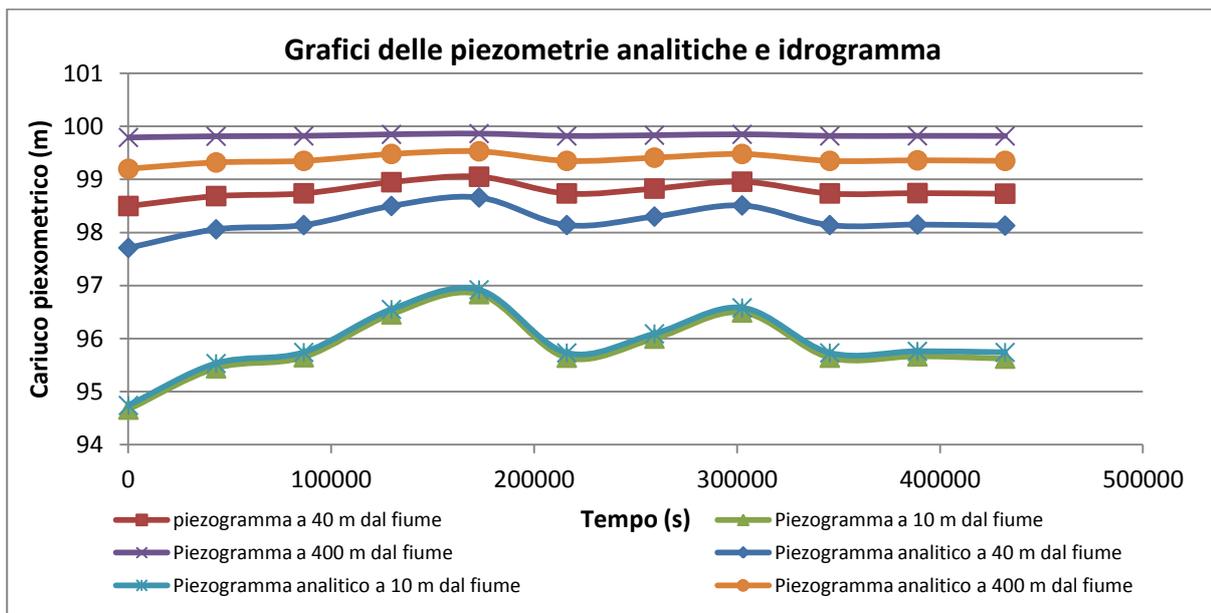


Figura 3b – 3c – Oscillazioni dell'idrogramma e risposta della falda a distanze crescenti dal fiume; risposta del modello analitico alle sollecitazioni dovute all'onda di piena

Applicando la relazione di Pinder e Cooper (1959) secondo Colombo et al. (2011), l'effetto dell'onda di piena, che induce un'oscillazione di circa 2 metri sul fiume (Fig. 3a), viene progressivamente smorzata allontanandosi dal fiume (Fig. 3b). Già a 40 metri da esso, ad esempio, si ha un effetto sui livelli di falda molto ridotto; tale effetto scompare del tutto a 400 metri dalla sorgente delle oscillazioni piezometriche.

Sono stati calcolati i gradienti idraulici, immediatamente a valle della testa della lente (gradiente "di monte"), e a valle del piede della lente (gradiente "di valle"), a diversi istanti temporali (campionati ogni 43200 secondi), mentre transita l'onda di piena (Fig. 4).

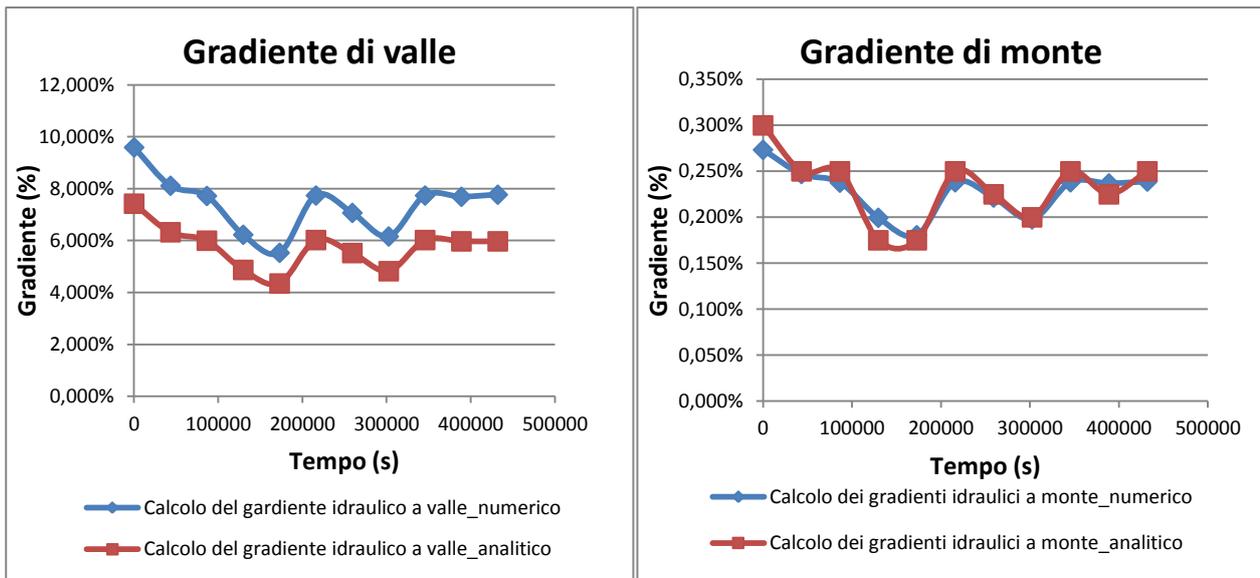


Figura 4 – Andamento dei gradienti di valle e di monte durante il transito dell’onda di piena (discretizzazione temporale ogni 43200 s, per un totale di 10 passi)

Dal confronto dei risultati ottenuti dai due modelli, si evince che il gradiente diminuisce all’aumentare dell’onda di piena in quanto la lente di ghiaia risulta essere un serbatoio naturale che smorza l’onda; tale serbatoio però si carica di acqua, e quando il fiume, durante la fase di recessione della piena, scende nuovamente di livello, induce un gradiente elevato; difatti in corrispondenza degli abbassamenti del livello idrometrico, il gradiente tende a risalire sia a monte che a valle; i valori maggiori di gradiente si hanno infatti in corrispondenza del minimo idrometrico nel fiume.

Tuttavia, il gradiente di monte si mantiene sempre intorno a valori inferiori a quelli critici. Il gradiente a valle, invece, può indurre notevoli criticità, visti gli elevati valori che raggiunge, pericolosità soprattutto durante la fase di recessione.

5.3 CASO 3: GALLERIE AD ELEVATA PERMEABILITA’ E DIVERSO SPESSORE A FORMA DI “T” CON FIUME A CARICO COSTANTE

In questa situazione si è voluta simulare la possibilità di avere una lente non completamente penetrante l’acquifero, ma solo parzialmente, disposta quindi a differenti quote rispetto il substrato impermeabile. Lo spessore del piede ora di 5 metri, è stato ubicato in tre diverse posizioni (Figura 5): a contatto con la superficie (Configurazione I), a metà dell’acquifero (Configurazione II), e a contatto con il substrato profondo (Configurazione III). Le dimensioni restano invariate. La possibilità in natura di trovare gallerie sospese nell’acquifero sono molto alte, dal momento che i canalicoli si formano sempre in alcune intercalazioni di maggior permeabilità.

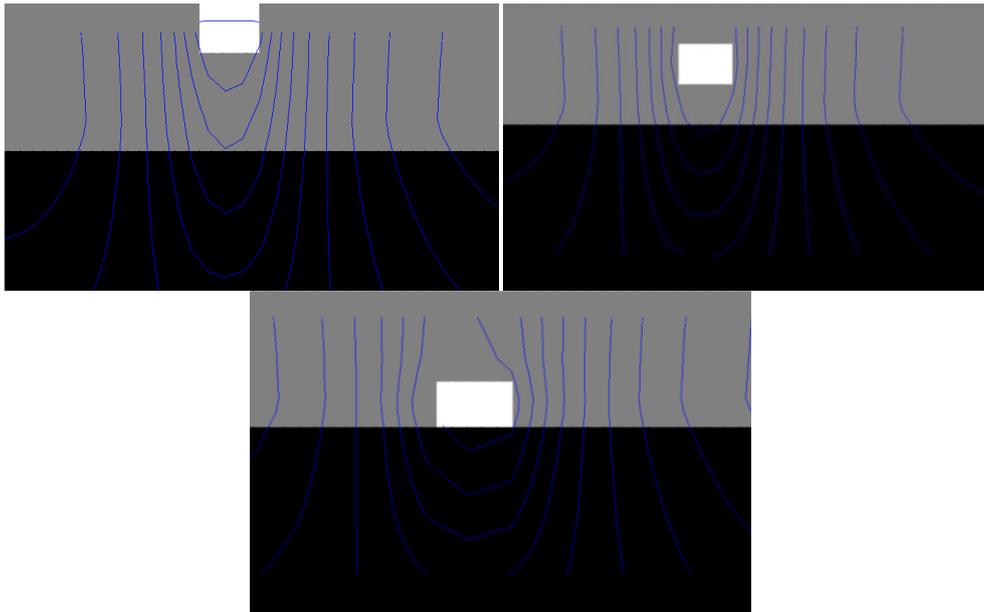


Figura 5 – Vista in sezione delle tre configurazioni testate (in alto a sinistra Configurazione I, in alto a destra Configurazione II, in basso Configurazione III)

I risultati del modello numerico sono una buona corrispondenza del modello analitico. La seguente Tabella 2 riporta i risultati, e il confronto con il caso precedente.

Tabella 2 – Risultati ottenuti con il modello numerico e con quello analitico e calcolo del gradiente idraulico

CONFIG.	MODELLO NUMERICO				MODELLO ANALITICO			
	I	II	III	CASO PRECEDENTE	I	II	III	CASO PRECEDENTE
H_2[m s.l.m.]	97.58	97.64	97.27	98.50	97.20	97.26	98.02	98.31
H_1[m s.l.m.]	95.00	95.02	94.99	94.66	94.74	94.75	95.8	95.02
J[%]	6.45	6.55	5.70	9.59	6.15	6.28	5.55	8.23

Rispetto al caso precedentemente trattato, comunque, si ha una notevole diminuzione del gradiente idraulico, con conseguente riduzione delle criticità. Il valore del gradiente, che si mantiene comunque piuttosto elevato, si riduce considerevolmente, quindi lo spessore del piede della lente ha una considerevole influenza sull'alterazione del flusso idrico, e quindi sul calcolo del gradiente idraulico. Inoltre, si osserva che con l'aumentare della profondità della lente, allontanandosi dunque dalla superficie, il valore del gradiente idraulico diminuisce ulteriormente (Fig. 6). Nel primo e secondo caso tuttavia il gradiente sembra essere molto simile. Più la lente è in superficie e più il gradiente risulta elevato, diminuendo quindi man mano che la lente risulta ad una quota superiore. È infatti ben rappresentato il fenomeno del piping, dal momento che il trascinarsi di piccole particelle avviene spesso a basse profondità piuttosto che in vicinanza al substrato; tale fenomeno è quindi riscontrabile ed osservabile per le deformazioni che ne derivano alla forma del suolo, spesso impregnato di acqua,

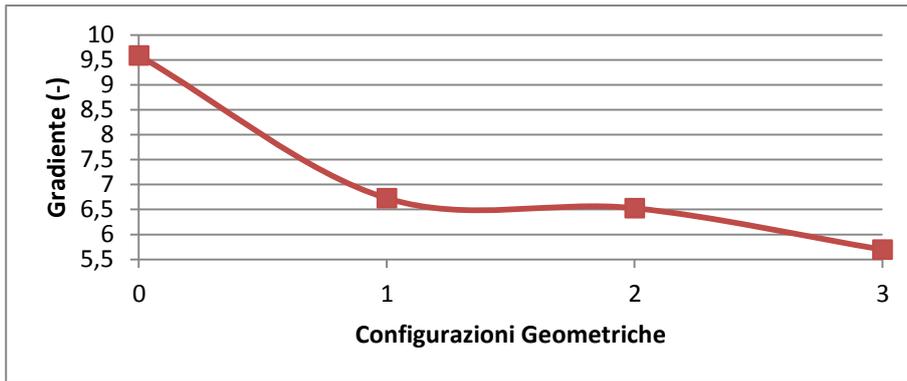


Figura 6 – Andamento dei gradienti idraulici in funzione della configurazione (Config. 0: lente a tutto spessore; C. 1: lente a contatto superficiale; C. 2: lente intermedia; C. 3: lente a contatto con il substrato)

5.4 CASO 4: GALLERIE A MAGGIOR PERMEABILITA' CON LENTE DISTACCATA DALLA ZONA A MONTE

Al fine di rappresentare un'altra situazione abbastanza diffusa nei casi reali, si è scelto di modificare il piede della lente, considerata ancora una volta di spessore pari a quello dell'acquifero. Esso, è stato allontanato progressivamente dalla testa, fino ad arrivare alla situazione di una piccola lente, isolata all'interno dell'acquifero, di lunghezza pari a 20 metri e prossima al fiume. Praticamente, eccezion fatta per la testa permeabile, si ha un'isola ghiaioso – sabbiosa immersa in un ambiente argilloso meno permeabile, spesso 15 metri. La seguente Figura 7 riporta la configurazione iniziale e quella finale studiate; tutte le configurazioni testate, intermedie tra quelle presentate, sono state ottenute aumentando, ad ogni passo, la distanza tra la testa e il piede della lente di 20 metri, lasciando invariata la distanza rispetto al fiume, pari sempre a 50 metri.

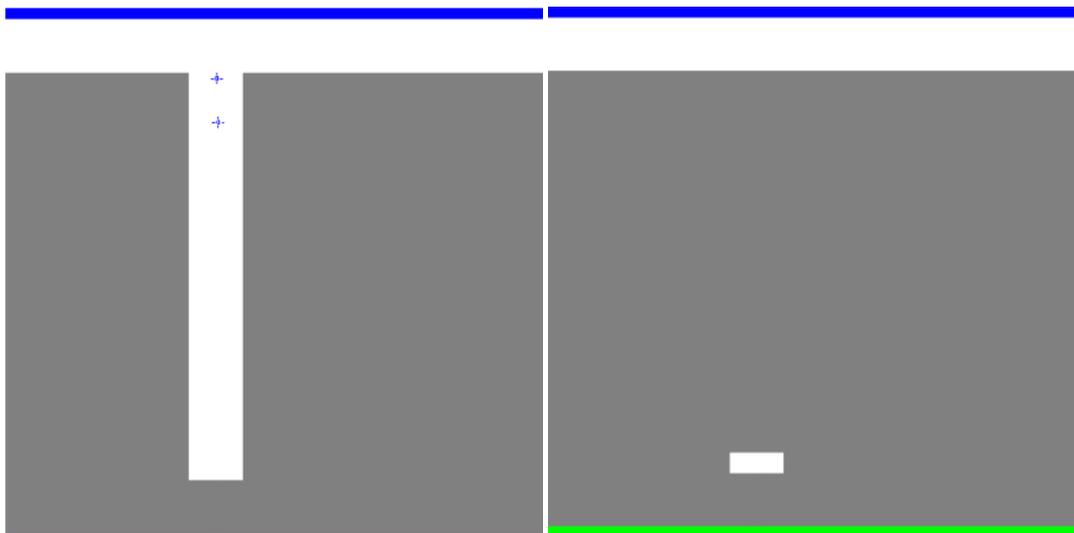


Figura 7 – Configurazione di partenza e configurazione finale testate

I risultati ottenuti con il modello analitico paiono, ancora una volta, avere una buona corrispondenza nel modello numerico (la Fig. 8 mostra il confronto numerico – analitico in una configurazione intermedia).

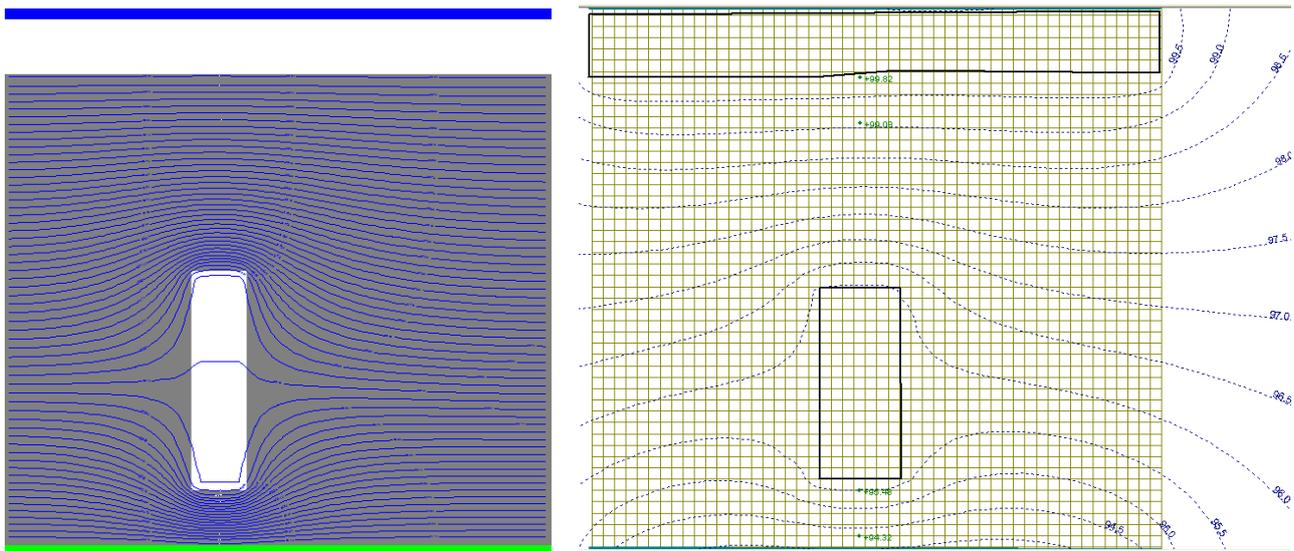


Figura 8 – Confronto tra le linee isopiezometriche ottenute dal modello numerico (a sinistra) e da quello analitico (a destra)

Per questa specifica configurazione sono stati calcolati due gradienti. Il primo, definito “di valle”, è stato calcolato tra la fine della lente ad alta permeabilità e il fiume, il secondo, definito “di monte”, è stato calcolato tra la base della testa della lente e un punto 40 metri a valle. Si è voluto, infatti, verificare quale influenza avesse la posizione della lente sia sulla criticità già riscontrata a valle, sia su un’eventuale criticità che si potrebbe venire a creare a monte, mano a mano che la lente si allontana verso valle. Il seguente grafico (Fig. 9) riporta il confronto tra il gradiente di monte e quello di valle, ottenuto dal modello numerico e da quello analitico, quando il piede si allontana progressivamente fino a 360 metri dalla testa.

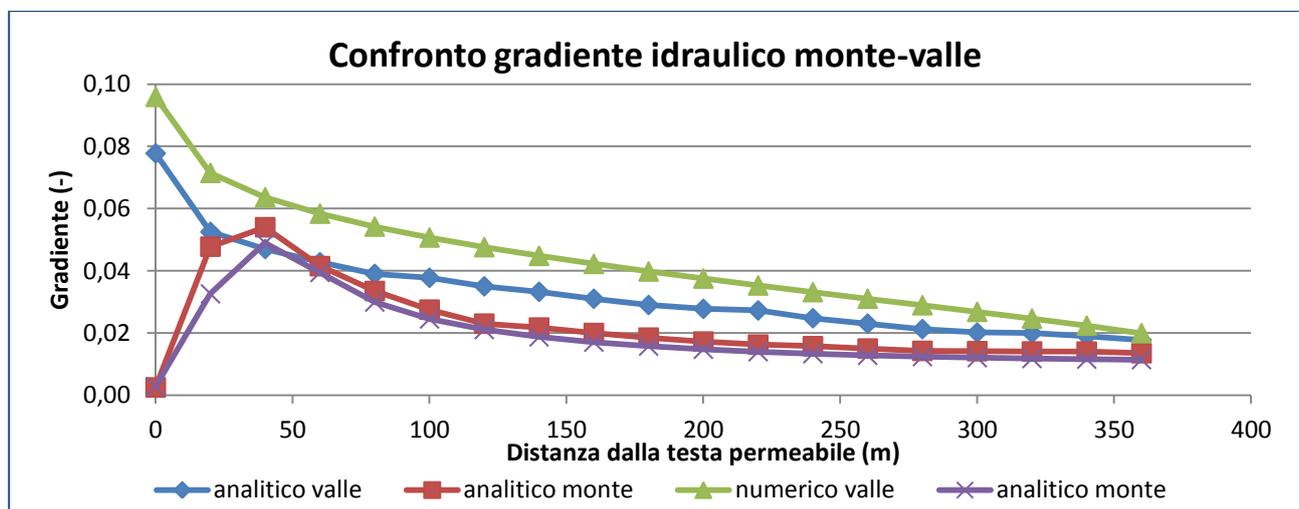


Figura 9 – Confronto tra gradiente idraulico di monte e di valle, ottenuto nel caso di modello numerico e analitico

Si vede come la differenza tra modello analitico e modello numerico sia contenuto e risulta maggiore nel caso di calcolo di gradiente a valle (probabilmente per la non piena corrispondenza del passo di discretizzazione fra i due modelli e le condizioni al contorno).

Quando la lente permeabile è a contatto con la testa, il gradiente a monte è piuttosto basso, praticamente nullo, dal momento che il flusso idrico attraversa una porzione di terreno ad elevata

permeabilità. A valle, invece, il gradiente è molto alto, vicino al 10%, quindi è possibile che ci siano delle instabilità (ipotesi già verificata nella configurazione iniziale).

Risulta in entrambi i casi che il gradiente a monte raggiunge un picco quando la lente si stacca da quella principale a circa 40 m. Dal picco in poi si assiste ad una progressiva discesa del gradiente sia per quello di monte che per quello di valle. Questo dal momento che, quando le due lenti sono vicine, si assiste ad un collegamento di serbatoi naturali, e tanto più essi risultano vicini tanto più la differenza di carico risulta elevata con maggior infiltrazione nell'area tra le due lenti.

Mano a mano che la lente permeabile si allontana dalla testa, venendo interrotta da una zona a bassa permeabilità, i gradienti, sia a monte sia a valle, decrescono, fino a diventare, quando la lente permeabile si riduce ad una sottile striscia larga 20 m vicino al fiume a valle, praticamente coincidenti.

5.5 CASO 5: GALLERIE A MAGGIOR PERMEABILITA' A DIVERSE DIMENSIONI

Mantenendo le dimensioni della lente (spessore 15 metri, larghezza sia della testa sia del piede della lente pari a 50 metri), si è voluto analizzare quali cambiamenti sono indotti sul gradiente modificando lo spessore della testa o del piede della lente.

La larghezza del piede della lente è stata fatta variare da 10 metri a 150 metri, con passo di 20 metri, mantenendo la forma della testa invariata. I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 3.

Tabella 3 – Variazioni di gradiente di monte e di valle legato alla variazione della dimensione del piede della lente

LARGHEZZA PIEDE LENTE [m]	J MONTE [%]	J VALLE [%]
10	0.69	7.38
30	0.41	9.43
50	0.27	9.59
70	0.23	9.93
90	0.20	10.12
110	0.18	10.25
130	0.16	10.34
150	0.17	10.76

L'aumento della larghezza del piede della lente induce una diminuzione del gradiente di monte, in quanto l'acqua riesce a passare in una zona a permeabilità più elevata di dimensioni maggiori, mentre a valle si ha un importante aumento del gradiente idraulico. Questo fenomeno causa dunque un aumento nella criticità di valle.

Allo stesso modo, mantenendo il piede della lente ad una larghezza costante, pari a 50 metri, è stata fatta variare la larghezza della testa della lente, da 10 a 90 metri, con passo 20 metri. I risultati ottenuti sono riportati nella seguente Tabella 4.

Tabella 4 – Variazioni del gradiente idraulico al variare della larghezza della testa della lente

LARGHEZZA TESTA LENTE [m]	J MONTE [%]	J VALLE [%]
10	0.29	9.48
30	0.29	9.53
50	0.27	9.59
70	0.25	9.65
90	0.19	9.75

Il gradiente di monte tende a diminuire quando la testa della lente si allarga, ma i valori sono sufficientemente piccoli tali da non instaurare alcun tipo di criticità. I gradienti di valle crescono all'aumentare della dimensione della testa, per lo stesso motivo precedentemente illustrato.

5.6 CASO 6: GALLERIE A MAGGIOR PERMEABILITA' INTERSECANTI A VALLE A FORMA DI "V"

Alcune indagini recenti mostrano che talvolta quando le gallerie sono molto ravvicinate possono creare ampi vuoti, finendo per far crollare i terreni interposti, e congiungendosi tra di loro. Una possibile configurazione è quella quindi di rappresentare due gallerie che si uniscono a valle della testa della lente, i cui risultati sono riportati nella seguente Figura 10,. Si mostra che il gradiente praticamente è nullo a monte, e sensibilmente critico a valle con valori maggiori del caso iniziale ad un'unica lente.

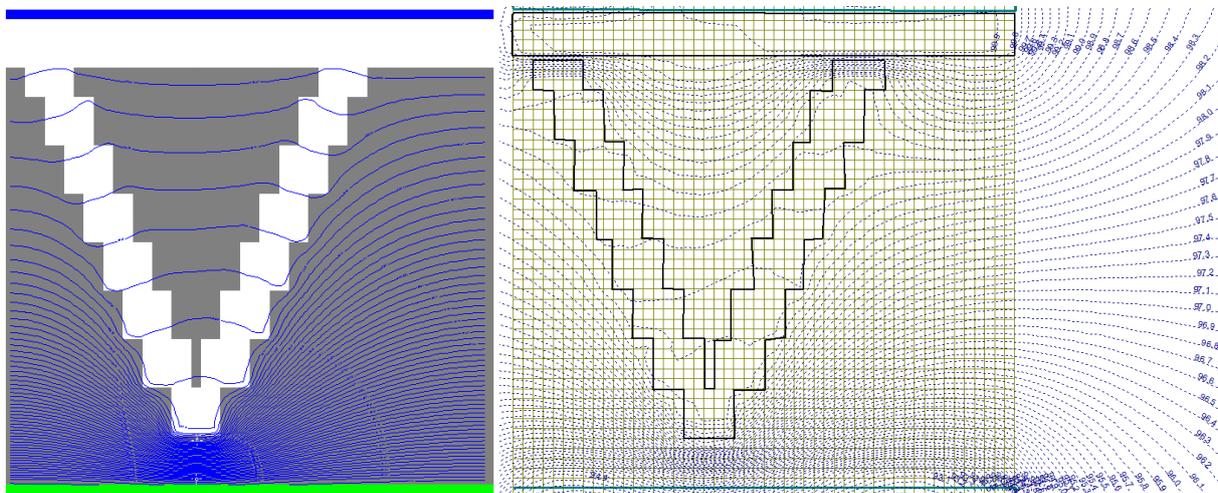


Figura 10 – Confronto dei risultati ottenuti con il modello numerico (a sinistra) e con il modello analitico (a destra)

Quanto ottenuto dai due modelli è, in questo caso differente, soprattutto all'interno dello spazio tra le due gallerie e la lente di testa. Tali differenze sono dovute, sempre, al modo in cui i due differenti modelli operano, ricordando che, in particolare, la trattazione analitica considera un dominio indefinito e non prevede condizioni al contorno, ma solamente punti di passaggio obbligati per le soluzioni delle proprie equazioni. Questa differenza è percepibile con chiarezza quando si confrontano i valori dei gradienti, così come risultano nella seguente Tabella 5.

Tabella 5 – Valori dei gradienti di monte e di valle ottenuti con il modello numerico e con quello analitico

	MODELLO NUMERICO	MODELLO ANALITICO
J MONTE [%]	0.31	1.59
J VALLE [%]	9.95	6.80

Il modello numerico produce un gradiente più elevato a valle, e più basso a monte, fornendo valori simili a quelli ottenuti nelle modellazioni precedenti. Il modello analitico, invece, produce dei valori inferiori. Ragionevolmente, risulta però accettabile la soluzione del modello numerico in quanto la configurazione a V, nella realtà è più critica di quella a T, per i motivi sopra elencati

5.7 CASO 7: DEPOSITI ALLUVIONALI O FLUVIOGLACIALI POSTI IN SOMMITÀ DI UN PENDIO

Una struttura che può dare origine agli stessi fenomeni studiati precedentemente, può essere un deposito alluvionale o fluvio-glaciale (di matrice ghiaioso – sabbiosa) posto in sommità di un pendio costituito da un terreno di tipo argilloso a permeabilità minore di diversi ordini di grandezza. Tale deposito digrada verso valle sino al torrente di fondo. E' questa la tipica struttura che si può incontrare lungo la fascia Appenninica, nella zona Piacentina. La situazione peggiore che potrebbe venire a crearsi è, quando sul pendio si ha una precipitazione concentrata in un breve lasso di tempo.

Il deposito studiato ha uno spessore di 15 metri circa nella parte sommitale del pendio mentre, a partire da circa 10 metri di profondità, fino a 15 circa, al contatto con il substrato roccioso impermeabile, si stacca, in direzione del recapito di valle, una lente ad alta permeabilità simile ad una colata di detriti antica.

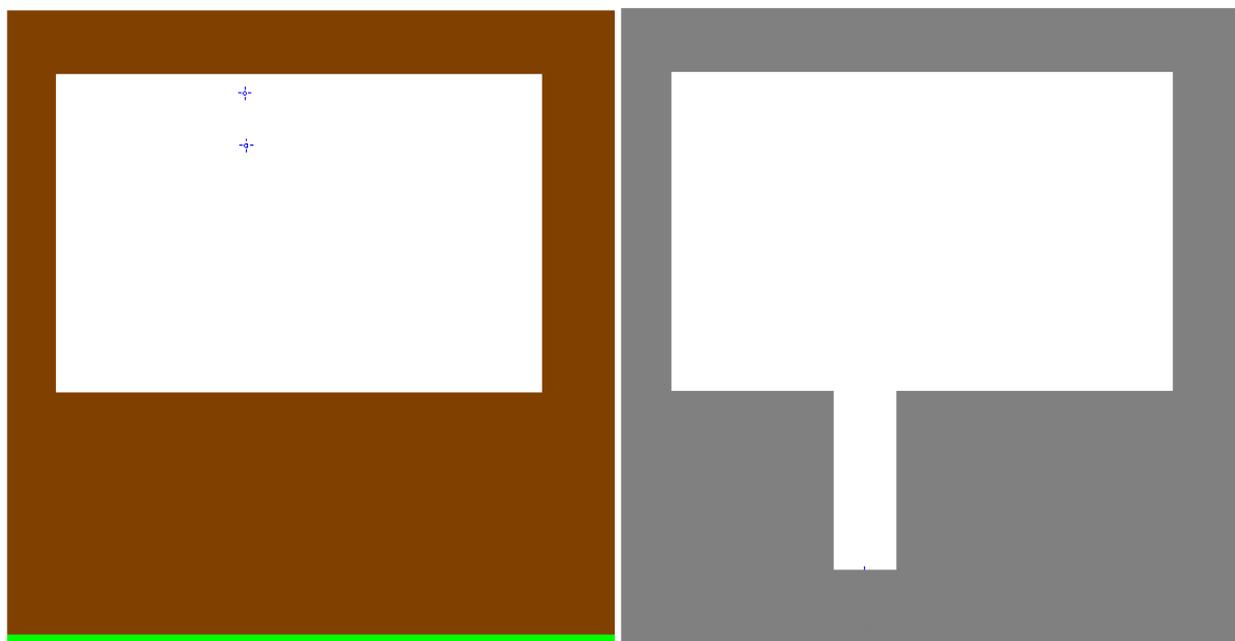


Figura 11 – Planimetria del deposito fluvio-glaciale; a sinistra, il layer superficiale, che mostra la sommità del pendio ad alta permeabilità, circondata da celle “No Flow” con lo scopo di rappresentare l’assenza di possibilità di circolazione idrica intorno alla sommità; a destra, il livello sottostante, che mostra la parte inferiore del deposito fluvio-glaciale immerso nel terreno argilloso, con la lente ad alta permeabilità che si propaga verso valle

La lente ad alta permeabilità che si propaga verso valle ha una evidente influenza sul gradiente idraulico in prossimità del recapito. È di interesse valutare il gradiente unicamente al piede della

lente ad alta permeabilità, dal momento che “a monte”, essendo immersi in una matrice ghiaioso – sabbiosa a notevole permeabilità, il flusso idrico è evidentemente elevato, e quindi il gradiente idraulico è, molto basso come già ampiamente visto nei casi studiati precedentemente. Inoltre, la zona sommitale funge da serbatoio naturale, in cui le acque meteoriche vengono raccolte e convogliate verso valle mediante la propagazione della zona ad alta permeabilità.

Si è notato anche che la variazione della larghezza della lente sabbiosa induce una notevole variazione sul gradiente idrico, aumentando o diminuendo le situazioni di criticità. La Figura 12 mostra il confronto tra i risultati ottenuti dal modello numerico e da quello analitico, in una delle configurazioni testate.

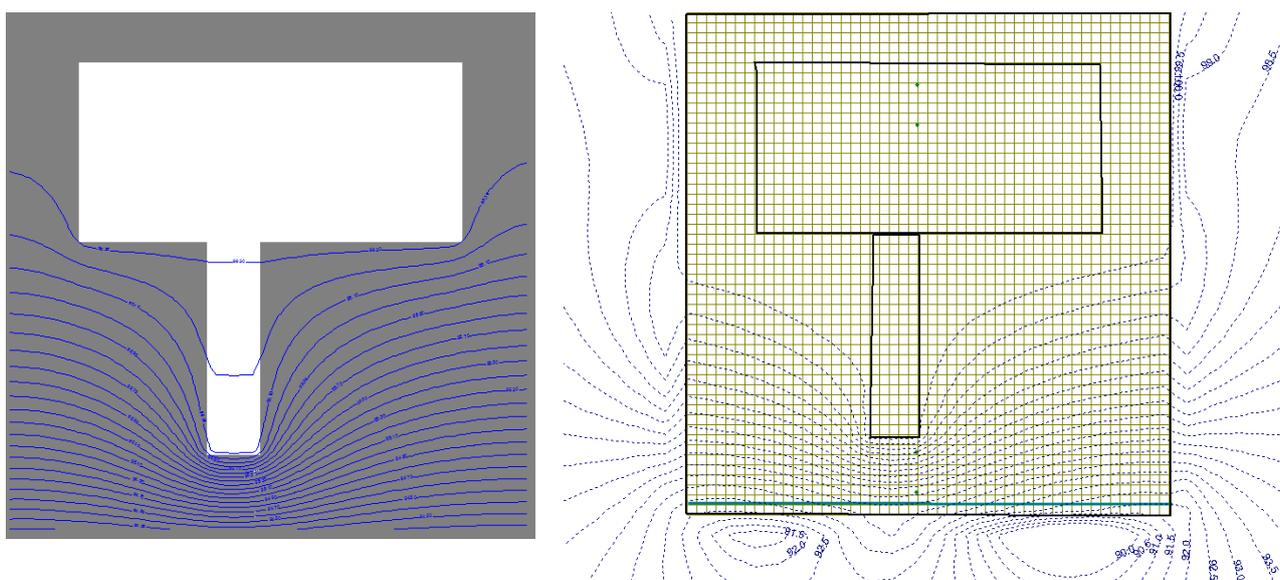


Figura 12 – Risultati ottenuti dai due modelli con la lente di larghezza pari a 50 metri; a sinistra i risultati del modello numerico, a destra quelli del modello analitico

I due modelli si comportano, ancora una volta, similmente tra loro, soprattutto in prossimità del piede della lente. Tuttavia, si individuano delle differenze tra i due modelli, dovute, ancora una volta, alla natura della soluzione analitica. I valori del gradiente idraulico ottenuti sono riportati nella Tabella 6.

Tabella 6 – Valori di gradiente idraulico in funzione della larghezza del piede della lente sabbiosa

LARGHEZZA DELLA LENTE SABBIOSA [m]	J NUMERICO [%]	J ANALITICO [%]
10	7.30	7.87
30	7.90	8.00
50	8.30	8.13

La tabella 6 mostra come il gradiente idraulico aumenti con la larghezza della lente sabbiosa. Infatti, più la lente è stretta, minore è il flusso idrico all’interno di essa; viceversa, una lente più larga consente ad un maggior flusso idrico di circolare, inducendo un carico più elevato al piede della lente, che produce un gradiente idraulico superiore.

Il modello analitico fornisce risultati analoghi a quelli del modello numerico. Le differenze, sebbene molto contenute, sono dovute alle diverse modalità di impostazione dei due modelli.

Si è osservato, invece sia nel numerico che nell'analitico, che cambiando la dimensione del corpo ad elevata permeabilità a monte, non sono indotte significative variazioni nel gradiente idrico, che si mantiene intorno all'8% in tutti i casi.

Pertanto, ai fini del controllo della criticità, nel caso di un sistema alimentato unicamente da ricarica meteorica superficiale, svolge un importante ruolo la dimensione della lente a matrice ghiaioso – sabbiosa ubicata in profondità.

Le strutture però più probabili in natura sono quelle in cui la lente di permeabilità minore risulta seguire la pendenza del pendio; la struttura precedente, semplificativa del fenomeno, potrebbe sottovalutare la componente geometrica del versante.

Tuttavia, il gradiente idraulico calcolato al piede della lente in direzione del fiume, si presenta inferiore rispetto al caso di lente trasversale. I valori ottenuti sono riportati nella seguente Tabella 7.

Tabella 7 – Valori del gradiente idraulico nel caso di lente obliqua

LARGHEZZA DELLA LENTE [m]	J NUMERICO [%]	J ANALITICO [%]
10	4.78	5.50
30	5.12	6.00
50	5.62	6.22

Quando la lente ad alta permeabilità segue l'andamento del pendio anziché essere trasversale ad esso, il gradiente si attesta su valori decisamente più bassi, di circa 3 punti percentuali. Questo fenomeno può essere dovuto al fatto che con lente obliqua, il flusso idrico segue già una direzione preferenziale verso valle, riducendo il carico al piede della lente.

L'andamento del gradiente, comunque, è il medesimo che nel caso di lente trasversale, ossia aumenta con la larghezza della lente stessa, per le motivazioni già esposte.

6 RELAZIONI TRA PARAMETRI ACQUIFERO E L'ANDAMENTO DEI GRADIENTI:

È di interesse, ma anche di uso pratico, riuscire a comprendere quale legame possa sussistere tra l'andamento dei valori del gradiente idraulico (limitatamente al valore di valle, che, nei casi studiati in precedenza, assume valori critici o sub – critici), e alcuni parametri dell'acquifero.

Se si considera il caso di una lente posta a distanze differenti dalla testa permeabile, è possibile riconoscere una funzione di tipo logaritmico che lega la distanza ai valori di gradiente, come rappresentato nella seguente Figura 11.

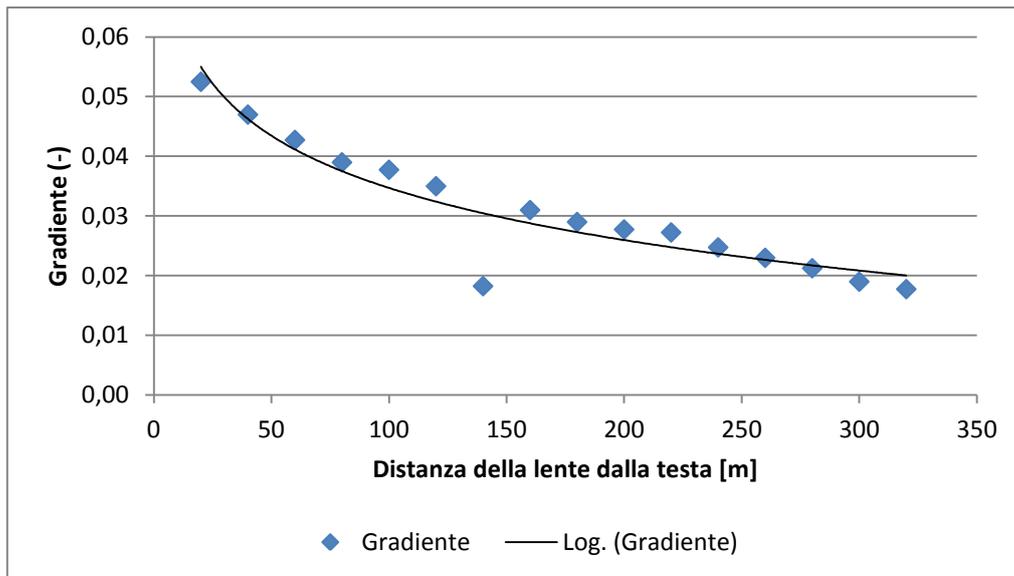


Figura 11 – Relazione tra distanza e gradiente

L'andamento della relazione è logaritmico, assumendo una forma del tipo $y = -0.014 \ln(x) + 0.099$.

Considerando invece, sempre per il solo gradiente di valle, la relazione tra spessore della lente (piede e testa) e gradiente, è possibile individuare una funzione che non è più logaritmica, ma diventa polinomiale di secondo ordine (Fig. 12).

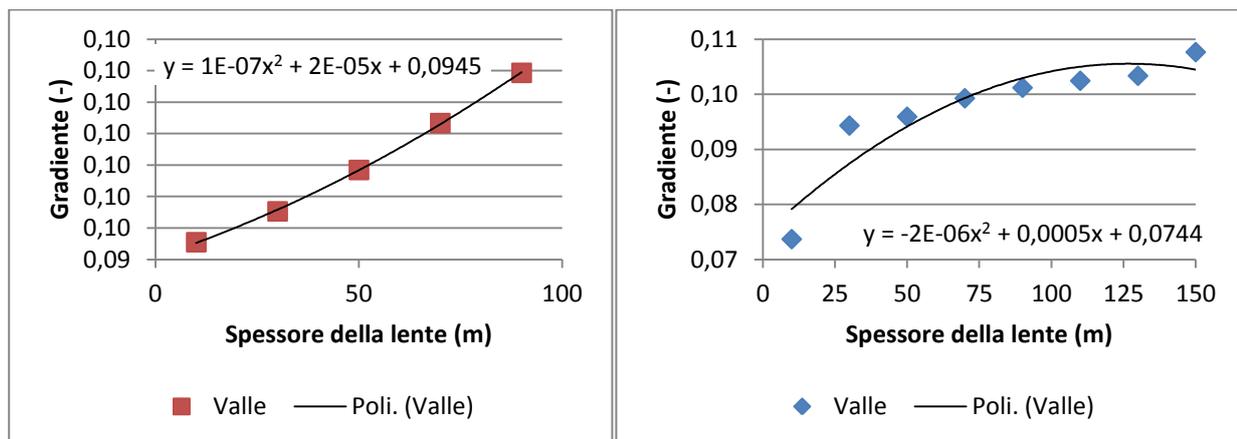


Figura 12 – Andamento polinomiale del secondo ordine del gradiente di valle nel caso di allargamento della testa della lente (a sinistra) e nel caso di allargamento del piede della lente (a destra)

Mutando lo spessore della lente, il gradiente idraulico sembra seguire una legge polinomiale del secondo ordine, con coefficiente negativo quando muta la dimensione del piede della lente, positivo quando cambia la dimensione della testa. Invece, la distanza della lente dalla testa permeabile, influenza il gradiente secondo una legge logaritmica.

7 CONCLUSIONI

Il fenomeno del piping può avvenire in seguito alla presenza di diverse e numerose gallerie drenanti site lungo le ripe fluviali di matrice limoso – argillosa. Tale struttura idrogeologica può causare situazioni di instabilità. Esistono in natura diverse strutture che potenzialmente possono dare origini a fenomeni di piping.

La presenza di gallerie dirette lungo il pendio e perpendicolari ad un fiume, possono dare origine a gradienti prossimi al 10% e superiori a quello critico per la stabilità. Si è potuto vedere come il valore del gradiente sia funzione anche della dimensione della larghezza della lente in testa e della galleria perpendicolare al fiume (quest'ultima influenza maggiormente la crescita del gradiente); la presenza di una lente progressivamente distaccata dalla galleria a monte produce un aumento del gradiente a monte di essa tale da indurre due fenomeni di potenziale franamento sia a monte che a valle del sistema di gallerie. Se, inoltre, la galleria si trova a diverse profondità rispetto al substrato, è possibile vedere come la situazione peggiore si abbia quando la lente è posta in sommità dell'acquifero, così come si può osservare nella realtà in presenza di fenomeni di piping. È riscontrabile anche che, qualora due gallerie ad alta permeabilità si intersechino a valle, esse trasportano molto materiale e, essendo convogliata nello stesso punto una quantità di acqua molto elevata, si hanno carichi idraulici che danno origine a gradienti superiori a qualsiasi altra struttura. La presenza di depositi fluvioglaciali, se tali si prolungano al di sotto di una coltre argillosa e se sono sottoposti ad una ricarica molto elevata, fungendo da serbatoi naturali, creano situazioni di instabilità al piede del versante stesso.

8 BIBLIOGRAFIA

BONOMI C., FRANCANI V., GATTINONI P., VILLA M., 2005, *Il piping come fattore di innesco del franamento: il caso di Stava*, Quaderni di Geologia Applicata, Pitagora Editrice, Bologna, vol. 2, pp 297 - 309

COLOMBO L., CREMONESI D., FRANCANI V., 2012, Mitigation of the piezometric oscillations near riverbanks using horizontal drainage systems, *Environmental Earth Sciences*, in press

COLOMBO L., CREMONESI D., FRANCANI V., 2011, Strutture idrogeologiche critiche per la stabilità delle ripe dei corsi d'acqua: il caso del Torrente Pioverna (Valsassina, Lecco, Italy), *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, Vol. 2 – 2011, DOI: 10.4408/IJEGE.2011-02.O-03

CROSTA G., DI PRISCO G., 1999, *On slope instability induced by seepage erosion*, *Can J. Geotech* 36: 1056 - 1073

DELLA ROSSA M. C., FRANCANI V., GATTINONI P., 2003, *Studio idrogeologico del territorio monzese: individuazione e caratterizzazione delle zone a bassa resistenza*, Quaderni di Geologia Applicata, Pitagora Edizioni, Bologna, vol .2, pp 103 – 120

HAITJEMA H. M., 1995, *Analytical Element modeling of groundwater flow*, ClassPark Publishing, Indiana University

IVERSON R., RICHARD M., 2000, *Landslide triggering by rain infiltration* *Water Resources Research*, vol 36 NO 7, Pages 1897 – 1910, July 2000

MASETTI M., MARANGONI T., ALBERTI L., BROGIOLI G., FORMENTIN G., 2007, *Experimental studies and numerical modeling of surface water – groundwater interaction in a semi – disconnected system*, Proceedings of the 35 IAH Congress, Groundwater and Ecosystems, Lisbon, Portugal.

MCDONALD M. G, HARBAUGH A.W., 1984, *A modular three dimensional finite difference ground water flow model*. U.S. Geological Survey Open File Report 83-875.

PINDER F. G., BREDEHOEFT J.D., COOPER H.H., 1969, *Determination of aquifer diffusivity from aquifer response to fluctuations in river stage*, Water Resources Program, Department of Civil Engineering, Princetown University, Princeton, New Jersey, Water Resources Research, Vol. 5 No. 4 1969

STAIANO T., RINALDI M. E PARIS E., 1995., *Seepage and stability analysis of embankments during flood events*, Department of Civil Engineering, University of Florence, Italy