

Costruzione Grafica dei Reticoli di Flusso delle Acque Sotterranee

Eileen Poeter and Paul Hsieh
Traduzione: Alessio Fileccia

Costruzione Grafica dei Reticoli di Flusso delle Acque Sotterranee

The Groundwater Project

Eileen Poeter

*Dipartimento di Geologia e Ingegneria Geologica
Colorado School of Mines
Golden Colorado, USA*

Paul Hsieh

*Consulente in Idrologia delle Acque Sotterranee
Redwood City, California, USA*

*Traduzione italiana: Alessio Fileccia
Consulente in Idrogeologia*

***Costruzione Grafica
dei Reticoli di Flusso
delle Acque Sotterranee***

*The Groundwater Project
Guelph, Ontario, Canada*

“The Groundwater Project” si appoggia a contributi privati per la produzione di testi e la gestione generale del Progetto.

Vi invitiamo ad effettuare delle donazioni a “The Groundwater Project” così da continuare a rendere gratuiti i nostri libri. <https://gw-project.org/donate/> ↗

Grazie.

Tutti i diritti sono riservati. Questa opera è protetta da copyright. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma o con ogni mezzo, senza il permesso scritto degli autori (per ottenerlo, contattare: permissions@gw-project.org). Sono altresì vietate la distribuzione commerciale ed ogni forma di riproduzione.

I testi di GW-Project possono essere scaricati liberamente dal sito gw-project.org.

Chiunque può condividere il link gw-project.org per scaricare i lavori di GW-Project. Non è permesso inserire i documenti di GW-Project su altri siti web, né inviare direttamente copie degli stessi ad altri.

Copyright © 2020 Eileen Poeter e Paul Hsieh (Gli Autori)

Pubblicato da the Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2020.

Poeter, Eileen

Graphical Construction of Groundwater Flow Nets / Eileen Poeter and Paul Hsieh
- Guelph, Ontario, Canada, 2020.

68 p.

ISBN 978-1-77470-127-0

Siete invitati ad iscrivervi alla mailing-list di “the Groundwater Project” per essere informati su nuove pubblicazioni, eventi e modalità per collaborare al progetto. Iscrivervi alla mailing-list ci aiuta a costruire una comunità internazionale di studiosi degli acquiferi [Sign-up](#)

Citazione: Poeter, Eileen and Paul Hsieh, 2020, [Graphical Construction of Groundwater Flow Nets](#). The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada.



Editori: John Cherry e Eileen Poeter

Direzione: John Cherry, Stephen Moran, Everton de Oliveira e Eileen Poeter

Comitato Organizzatore: John Cherry, Allan Freeze, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Douglas Mackay, Steven Moran, Everton de Oliveira, Beth Parker, Eileen Poeter, Ying Fan, Warren Wood, e Yan Zheng.

Traduzione italiana: Alessio Fileccia

Indice

COSTRUZIONE GRAFICA DEI RETICOLI DI FLUSSO DELLE ACQUE SOTTERRANEE	I
AUTORI.....	II
PER FAVORE, CONSIDERA DI FARE UNA DONAZIONE	III
COPYRIGHT.....	IV
INDICE	V
PRESENTAZIONE DI THE GROUNDWATER PROJECT.....	VII
PREMESSA.....	VIII
PREMESSA ALLA VERSIONE ITALIANA	IX
RINGRAZIAMENTI	X
1 INTRODUZIONE.....	1
1.1 IN COSA CONSISTE LA COSTRUZIONE GRAFICA DEL RETICOLO DI FLUSSO?	2
2 COSTRUZIONE DEL RETICOLO DI FLUSSO	6
2.1 METODI PER LA COSTRUZIONE DEI RETICOLI DI FLUSSO.....	6
2.2 DISEGNO DEL RETICOLO DI FLUSSO PER UN MEZZO OMOGENEO ED ISOTROPO.....	7
2.2.1 <i>Criteria Fondamentali per Tracciare un Reticolo di Flusso</i>	7
2.2.2 <i>Fasi Costruttive del Reticolo di Flusso con Carta e Matita</i>	7
2.3 DISEGNO DEL RETICOLO DI FLUSSO AL DI SOTTO DI UNA BARRIERA IMPERMEABILE	7
2.4 CALCOLO DELLA PORTATA	12
2.5 COSTRUZIONE DI UN RETICOLO DI FLUSSO IN ACQUIFERO FREATICO CON LIMITE SUPERIORE CORRISPONDENTE ALLA TAVOLA D'ACQUA.....	14
2.6 IL METODO "LEGGI, GUARDA, AGISCI" APPLICATO ALLA COSTRUZIONE DEI RETICOLI DI FLUSSO	15
2.7 I RETICOLI DI FLUSSO FORNISCONO SPUNTI DI APPRENDIMENTO SUL FLUSSO IDRICO SOTTERRANEO	17
2.8 COSTRUZIONE DI UN RETICOLO DI FLUSSO IN UN MEZZO CON CONDUCEBILITÀ IDRAULICA ANISOTROPA	20
2.9 COSTRUIRE E STUDIARE SISTEMI DI FLUSSO REGOLATI DALLA TOPOGRAFIA	21
2.10 SOMMARIO	22
2.10.1 <i>Nota sui Sistemi di Flusso Idrico Sotterraneo in Condizioni di Non Equilibrio</i>	24
3 ESERCIZI	25
ESERCIZIO 1.....	25
ESERCIZIO 2.....	26
ESERCIZIO 3.....	27
ESERCIZIO 4.....	28
4 BIBLIOGRAFIA.....	29
5 APPROFONDIMENTI (BOX)	30
BOX 1 - RIPASSO DEL CARICO IDRAULICO	30
BOX 2 - RIPASSO DELLA LEGGE DI DARCY	33
BOX 3 - DERIVAZIONE: FORMULA PER LA PORTATA ATTRAVERSO UN RETICOLO DI FLUSSO	37
BOX 4 - DISEGNO DEL RETICOLO DI FLUSSO PER UN ACQUIFERO LIBERO CON LIMITE LA TAVOLA D'ACQUA	42
BOX 5 - TRACCIAMENTO DEL RETICOLO DI FLUSSO IN MEZZI ANISOTROPI	46
BOX 6 - COSTRUIRE E STUDIARE I SISTEMI DI FLUSSO REGOLATI DALLA TOPOGRAFIA	53
<i>Introduzione</i>	53
<i>Equazione Fondamentale</i>	54
<i>Condizioni ai Limiti</i>	54
<i>Utilizzare il Modello</i>	54

<i>Esempio 1</i>	56
<i>Esempio 2</i>	57
6 SOLUZIONI DEGLI ESERCIZI	61
ESERCIZIO 1 - SOLUZIONE	61
ESERCIZIO 2 - SOLUZIONE	63
ESERCIZIO 3 - SOLUZIONE	64
ESERCIZIO 4 - SOLUZIONE	65
7 BREVE PROFILO DEGLI AUTORI	66
8 BREVE PROFILO DEL TRADUTTORE	67
9 MODIFICHE ALL'EDIZIONE ORIGINALE	A

Presentazione di The Groundwater Project

I soci e membri dell'Agenzia delle Nazioni Unite UN-Water stabiliscono i loro progetti con alcuni anni di anticipo. Il tema del World Water Day del 22 marzo 2022, è: "L'acqua sotterranea: rendere visibile l'invisibile." Tale proposta è molto appropriata per l'uscita dei primi testi di Groundwater Project (GW-Project) nel 2020, avente lo scopo di rendere visibile l'acqua sotterranea.

The GW-Project, un'organizzazione non-profit registrata in Canada nel 2019, si è data il compito di contribuire a migliorare l'istruzione portando un nuovo metodo alla creazione e diffusione della conoscenza e della soluzione di problemi. The GW-Project gestisce il sito web <https://gw-project.org/> come piattaforma globale per una diffusione democratica delle conoscenze sugli acquiferi ed è basata sul principio che:

"Il sapere dovrebbe essere libero e quello migliore dovrebbe essere libero sapere." Anonimo

La missione di the GW-Project è quella di rendere accessibile liberamente online, materiale educativo di alta qualità ed in molte lingue diverse per tutti quelli che desiderano imparare le problematiche legate all'acqua sotterranea e comprendere come essa si relaziona e sostiene i sistemi ecologici e le attività umane. Questo costituisce un nuovo aspetto di impegno educativo globale, nel senso che è basato sul volontariato professionale da parte di accademici, consulenti e personale in quiescenza provenienti da diverse discipline di studio. The GW-Project è costituito da centinaia di volontari, in continuo aumento e provenienti da più di 200 organizzazioni di 14 paesi e 6 continenti.

The GW-Project costituisce uno sforzo continuo, con centinaia di libri da pubblicare online nei prossimi anni, inizialmente in inglese e quindi in altre lingue, per essere scaricati ovunque Internet sia operativo. Le pubblicazioni di the GW-Project comprendono anche materiale di supporto come filmati, lezioni, prove di laboratorio, e sussidi didattici in collegamento a software di dominio pubblico nel settore acque sotterranee e come appoggio al processo educativo.

The GW-Project GW-Project è un'entità in continuo divenire, con ulteriori edizioni dei libri pubblicate periodicamente. I lettori sono quindi invitati a proporre eventuali modifiche.

Vi ringraziamo di far parte della Comunità di the GW-Project. Speriamo di ricevere da voi i vostri commenti sui testi ed il materiale educativo. Apprezziamo idee e volontari.

Il Comitato Organizzatore di The GW-Project

August 2020

Premessa

L'abilità di comprendere e costruire i reticoli di flusso è parte essenziale delle conoscenze di un idrogeologo. Sebbene vi siano altri testi pubblicati da The Groundwater-Project questo libro ne dà una illustrazione approfondita, in particolare per quanto riguarda la fase grafica. Con l'utilizzo di carta e matita gli studenti possono comprendere meglio i principi del flusso sotterraneo.

Sono stati pubblicati molti testi di idrogeologia negli ultimi cinquant'anni e quasi tutti hanno sottolineato l'importanza dei reticoli di flusso per lo studio delle acque sotterranee, con numerose pagine relative alla descrizione del metodo manuale per la loro costruzione. Nell'attività professionale reticoli di flusso si ottengono velocemente con l'uso di programmi dopo avere fissato le condizioni al contorno e la distribuzione della conducibilità idraulica. La parte più complessa per coloro che si avvicinano per la prima volta a questa tecnica è determinare le condizioni ai limiti e capire come queste, insieme alla conducibilità idraulica modificano la distribuzione del carico idraulico e delle linee di flusso. E' quindi fondamentale che chi si vuole dedicare a questo compito, sviluppi una comprensione ed una rappresentazione del reticolo di flusso per un determinato sistema, prima di ottenere una simulazione al computer.

La rappresentazione si può sviluppare ricorrendo alla costruzione del reticolo di flusso "alla vecchia maniera", con carta, matita ed a mano. Questo libro spiega il metodo e propone dei filmati che mostrano esperimenti di laboratorio sulle acque sotterranee che seguono un flusso del tipo Hele-Shaw (flusso attraverso due dischi paralleli separati da una stretta fessura) e modelli fisici con traccianti colorati che rivelano le linee di flusso. Viene inoltre fornito un programma online interattivo, per permettere al lettore di migliorare la comprensione del flusso sotterraneo con la creazione di sistemi di flusso e complesse distribuzioni della conducibilità idraulica. Eileen Poeter ha iniziato la stesura del libro e proposto a Paul Hsieh di collaborare. Il risultato finale è un testo sulla comprensione e costruzione del campo di moto preparato da due esperti riconosciuti a livello internazionale. Il testo è stato poi sottoposto ad una completa revisione critica. Come conseguenza il materiale contenuto rappresenta lo stato dell'arte che meglio supporta gli studi per la gestione e protezione delle acque sotterranee.

John Cherry, Responsabile di The Groundwater Project
Guelph, Ontario, Canada, Luglio 2020

Premessa alla versione italiana

In Italia l'Idrogeologia non ha ancora goduto della stessa divulgazione ricevuta da altre materie delle Scienze della Terra. Lo stesso non è vero per i paesi di lingua anglosassone dove si assiste da tempo anche ad una fruttuosa collaborazione tra geologi, ingegneri e matematici. Gli argomenti trattati in questo libro sono un buon esempio di tale collaborazione e questo è uno dei motivi per cui ho accettato di occuparmi della traduzione. Un altro aspetto che ho considerato è la chiarezza e sinteticità con cui i concetti, non sempre semplici, sono esposti e resi comprensibili. Questo approccio, denota da parte degli Autori la loro familiarità con la materia, impegno e successo per renderla fruibile ed applicabile da parte di una vasta platea di lettori. Lo stesso approccio lo ritroviamo in tutti gli altri testi disponibili su GW-Project. E' pertanto un esempio che mi sento di appoggiare e far conoscere, considerata anche l'esperienza e l'autorevolezza di tutti gli autori.

Alessio Fileccia,
volontario di The Groundwater Project
ottobre 2024

Ringraziamenti

Siamo grati per le revisioni utili e dettagliate a questo libro, da parte dei seguenti:

- ❖ Xiaolang Zhang, PhD student dell'Università di Hong Kong, Hong Kong;
- ❖ Jimmy Jiao Professore all'Università di Hong Kong, Hong Kong;
- ❖ Kamini Singha, Professore al Dipartimento di Geologia ed Ingegneria Geologica per la Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA;
- ❖ Alain Rouleau, Università del Québec a Chicoutimi, Saguenay, Canada;
- ❖ Barret Kurlyk, Assistant Professor con Cattedra di Ricerca in Risorse Idriche Costiere, Dipartimento di Ingegneria Civile e delle Risorse, Università Dalhousie, Sexton Campus, Halifax, Canada;
- ❖ Allan Freeze, Professore Emerito, Ingegneria Geologica, Università della British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada; e,
- ❖ Xiao-Wei Jiang, Professore di Idrogeologia, Scuola delle Risorse Idriche ed Ambiente, Università Cinese di Geoscienze, Beijing Cina.

Siamo grati ad Amanda Sill per la supervisione e produzione di questo testo come ad Elhana Dyck per il controllo finale, entrambe di the Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada. Ringraziamo inoltre le indicazioni ed i contributi Everton de Oliveira, Diego Nogueira e Bruna Soldera di the Groundwater Project, São Paulo, São Paulo, Brazil, per averci portato al completamento del libro.

Ringraziamo infine il collega dr Alessio Fileccia, per la disponibilità dimostrata nel preparare la traduzione completa del testo, dall'inglese.

Eileen Poeter
Paul Hsieh

1 Introduzione

Il flusso dell'acqua sotterranea al di sotto della superficie terrestre rimane invisibile all'occhio umano ed il massimo che l'idrogeologo può ottenere è un'abilità di visualizzare la distribuzione dei carichi idraulici e delle linee di flusso nello spazio tridimensionale. Questo è innato per alcuni, mentre la maggior parte, prima di avere una visione intuitiva del sistema, ha bisogno di vedere e pensare ad esempi bidimensionali del flusso in regime permanente rappresentati come un reticolo, prima che tutto diventi intuitivo. L'energia dedicata a padroneggiare la visualizzazione dei sistemi di flusso non è comunque spesa inutilmente. La **Figura 1** riporta il collegamento ad un video che mostra il movimento dell'acqua con un tracciante attraverso un mezzo poroso. I reticoli di flusso possono mostrare la distribuzione delle forze che spingono il flusso ed i percorsi.

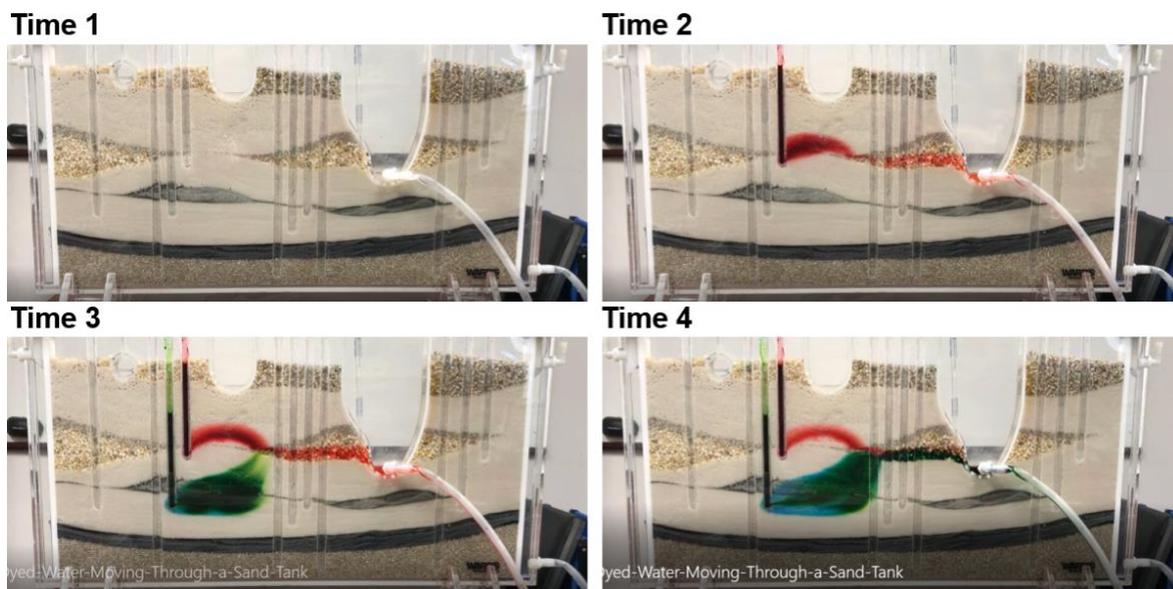


Figura 1 - [Click to view](#)  filmato di una sostanza tracciante che si sposta in un contenitore riempito di sabbia satura. Alcune immagini del video sono riportate in alto: Time 1 è la situazione prima di immettere il tracciante, così che le linee di flusso non si vedono; Time 2 è dopo l'iniezione del tracciante rosso in un pozzo superficiale e la sua migrazione verso il fiume; Time 3 è dopo che un tracciante verde è stato iniettato in un pozzo profondo ed ha cominciato a spostarsi in alto a destra; mentre, Time 4 è dopo che il tracciante verde ha raggiunto la lente di ghiaia e si è spostato verso il fiume. Il video migliora la comprensione del flusso, meglio delle immagini in alto. (Il contenitore di sabbia è stato costruito dagli Studenti all'Università del Wisconsin, Stevens Point. Riprese presso IGWMC of Colorado School of Mines. Edizione e commenti di Eileen Poeter.)

L'analisi grafica delle linee di flusso è uno strumento utile per ogni idrogeologo perchè: 1) permette una comprensione utile e veloce del sistema di flusso, o campo di moto, quando un computer non è disponibile; 2) aiuta il modellista a prefigurare i risultati di un modello numerico delle acque sotterranee; 3) e, per quelli che si sono da poco avvicinati alla materia, facilita la comprensione dei concetti fondamentali sul movimento delle acque sotterranee. In ogni caso conoscere le basi per impostare un modello numerico è ormai diventato fondamentale per un idrogeologo.

La **Figura 2** illustra un sistema di linee equipotenziali (in nero a tratteggio) e linee di flusso (freccie blu) in un acquifero in movimento. Questo libro spiega come disegnare graficamente una maglia di linee di flusso. Prima di passare all'uso del reticolo di flusso per comprendere il campo di moto, è meglio iniziare a capire la sua costruzione grafica in una situazione bidimensionale in regime permanente. E' utile allo scopo avere qualche conoscenza sui reticoli di flusso come: carico idraulico e condizioni ai limiti. Un altro testo della serie [Groundwater Project book](#) (Woessner and Poeter, 2020) spiega questi concetti in dettaglio, ne diamo comunque una breve illustrazione nelle pagine seguenti.

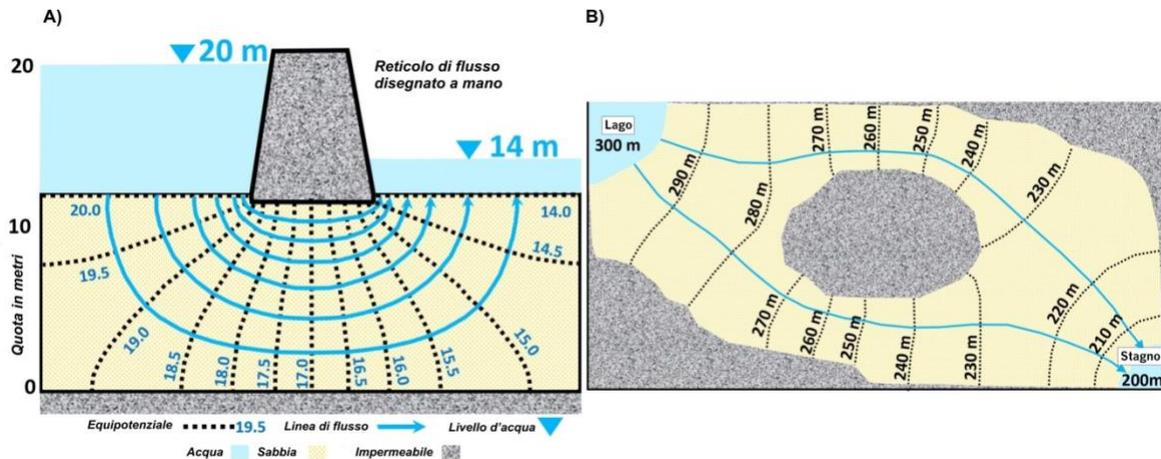


Figura 2 - Schema di reticoli di flusso: a) spostamento dell'acqua lungo un piano verticale al di sotto di una diga; e, b) spostamento dell'acqua da un lago ad uno stagno con un confinamento laterale in roccia (proiezione su di un piano orizzontale).

1.1 In cosa consiste la Costruzione Grafica del Reticolo di Flusso?

La costruzione grafica di un campo di moto consiste nell'utilizzo di carta e matita per risolvere l'equazione del flusso sotterraneo in condizioni di equilibrio ed in un mezzo omogeneo ed isotropo. Il regime di equilibrio, o permanente, è una situazione di equilibrio durante la quale i carichi idraulici, le portate e le linee di flusso non cambiano con il tempo, in altri termini le entrate sono uguali alle uscite. Un reticolo di flusso consiste in una serie di linee che si intersecano: linee equipotenziali che collegano punti ad uguale carico idraulico e linee di flusso che mostrano il percorso del flusso idrico sotterraneo come in **Figura 3**. Nella **Figura 3** una diga impermeabile delimita un bacino idrico. L'acqua filtra dal bacino a monte attraverso il materiale poroso, passa quindi sotto lo sbarramento e ritorna verso l'alto nel bacino a valle, con livello idrico inferiore. La distribuzione dei carichi idraulici regola il flusso sotterraneo lungo le linee di flusso nell'acquifero. Un breve sommario sul carico idraulico è nel [Box 1](#).

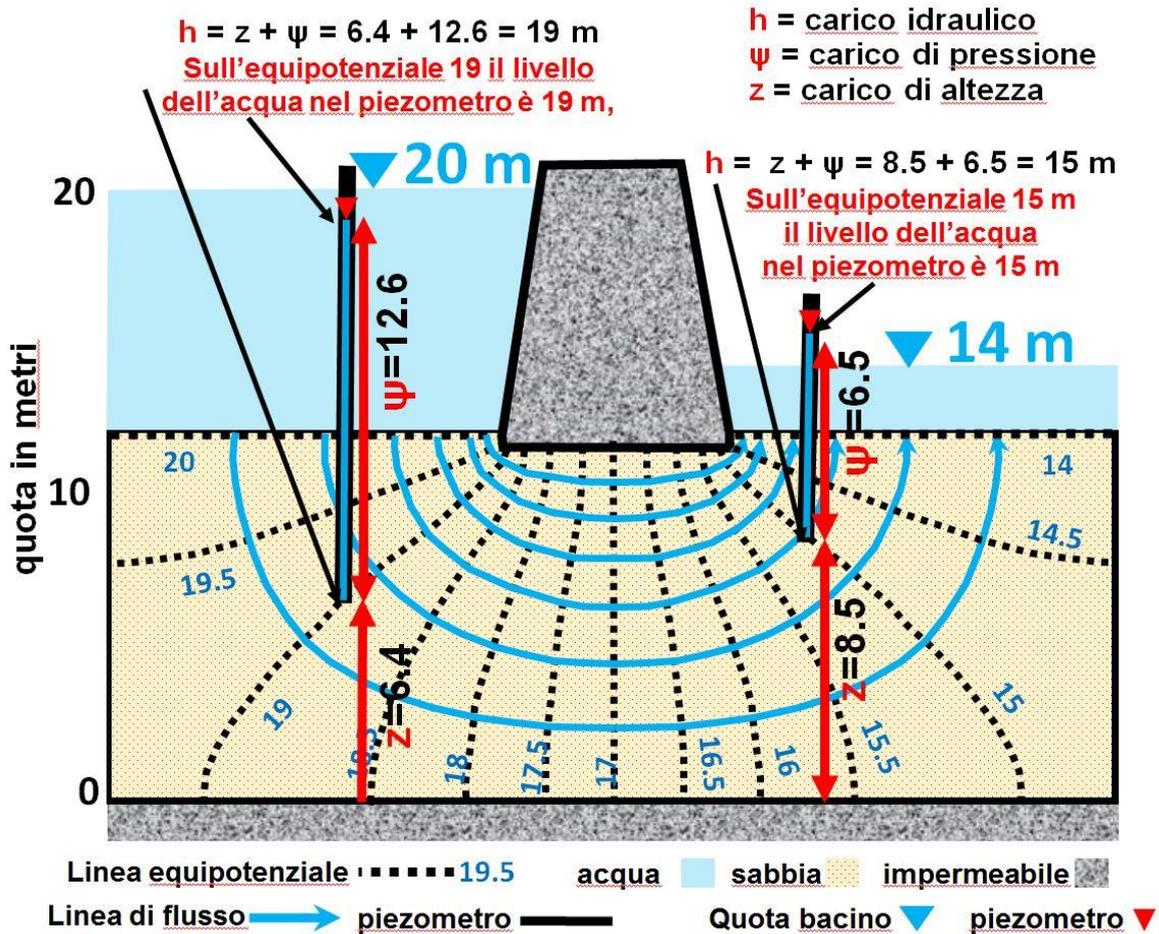


Figura 3 - Una sezione verticale del campo di moto sotto una diga, tra un serbatoio a quota più alta ed uno a quota più bassa. Un reticolo di flusso è composto da due serie di linee che seguono la legge di conservazione della massa di Darcy. Le linee equipotenziali collegano punti di uguale carico idraulico (in nero a puntini) e le linee di flusso rappresentano il percorso dell'acqua sotterranea (frecce blu).

Un sistema omogeneo ed isotropo è quello dove la conducibilità idraulica è costante in ogni punto e direzione di flusso. La conducibilità idraulica misura la facilità con la quale l'acqua attraversa un materiale ed è illustrata in un altro testo di [Groundwater Project book](#) (Woessner e Poeter, 2020). L'equazione del flusso idrico sotterraneo è basata sulla Legge di Darcy e della conservazione della massa, anch'essa discussa in [Groundwater Project book](#) (Woessner e Poeter, 2020). Considerato che questi concetti sono fondamentali per gli argomenti trattati in questo testo, il [Box 2](#) contiene un breve sommario sulla Legge di Darcy, la portata specifica ($v = Ki$), la velocità media lineare del flusso sotterraneo, ed il tempo di transito dell'acqua sotterranea.

La costruzione grafica di un reticolo di flusso risolve l'equazione del flusso sotterraneo bidimensionale in condizioni di equilibrio per un mezzo omogeneo ed isotropo con condizioni ben definite ai limiti. Le condizioni ai limiti sono illustrate in un altro testo di [Groundwater Project book](#) (Woessner e Poeter, 2020). Quando utilizziamo il metodo grafico nella situazione bidimensionale ed in condizioni di equilibrio, ci troviamo davanti a due tipi di limiti. Il sistema di flusso è delimitato da un carico idraulico costante oppure da un limite a flusso nullo. E' importante sottolineare che, per flusso nullo ("no flow") si

intende nessun passaggio di acqua attraverso il limite ed il flusso sotterraneo è parallelo al limite, in altri termini il limite stesso è una linea di flusso.

Una volta definite la geometria e le condizioni ai limiti si possono determinare i carichi idraulici per tutto il sistema; nota la conducibilità idraulica, utilizzando la Legge di Darcy e quella di conservazione della massa possiamo conoscere la portata tra due limiti a carico fisso. La procedura costruttiva del reticolo di flusso va applicata ad un mezzo omogeneo ed isotropo; esiste comunque un metodo per adattare un sistema anisotropo di modo che si possa disegnare un reticolo di flusso isotropo, che si può ritrasformare in uno anisotropo in un secondo momento. Tutto questo è spiegato nella Sezione 2.8 di questo testo. Nei casi in cui il parametro conducibilità idraulica è eterogeneo, la costruzione del reticolo di flusso richiede l'uso di un modello numerico.

Dobbiamo considerare due aspetti nel costruire le linee equipotenziali e di flusso per ottenere una soluzione accurata dell'equazione di flusso delle acque sotterranee. Prima di tutto i due gruppi di linee si incrociano perpendicolarmente e quindi la maglia ottenuta deve essere di forma quadrangolare (larghezza simile alla lunghezza). Il modo più realistico per l'occhio umano di ottenere un rapporto tra larghezza e lunghezza costante è quello di disegnare "quadrilateri con lati curvilinei" con rapporto tra i lati vicino ad 1 (**Figura 3**). Quando riusciamo ad soddisfare queste condizioni, le linee equipotenziali avranno un'equidistanza uniforme tra l'una e l'altra e la portata all'interno di ogni tubo di flusso (la zona compresa tra due linee di flusso vicine, misurata p. es. in metri cubi al secondo) sarà costante. Un'eccezione a questo, si può verificare vicino ai confini del dominio di studio dove è disegnato un tubo di flusso incompleto o parziale. Questa particolare situazione è discussa più avanti nel testo. Infine occorre ricordare che il valore della conducibilità idraulica non influisce nella distribuzione del carico idraulico in un mezzo omogeneo, ma se lo conosciamo allora possiamo utilizzare il reticolo di flusso per determinare la portata attraverso il sistema.

Una differenza importante tra l'utilizzo del metodo grafico e quello numerico è che il primo richiede il tracciamento di linee equipotenziali e di flusso, mentre il secondo non lo prevede. Gli idrogeologi di solito utilizzano il modello numerico per ricavare i carichi idraulici e quindi passano ad un codice di calcolo del flusso di particelle (particle tracking code) per disegnare le linee di flusso. Uno studio particolare può richiedere anche solo i carichi idraulici senza necessariamente ricavare i percorsi delle particelle.

Di solito un modello numerico idrogeologico ricava i carichi idraulici per una griglia o disposizione di punti e, a differenza di un reticolo grafico di flusso offre una certa flessibilità su come disegnare le linee equipotenziali. Per esempio non è necessario adottare la stessa equidistanza tra tutte le linee equipotenziali. Una simile flessibilità esiste anche per le linee di flusso. Un codice di flusso per le particelle permette di tracciare un percorso partendo da qualunque punto. Questa flessibilità si traduce nel fatto che il reticolo di flusso calcolato dal modello numerico non forma necessariamente una maglia di quadrilateri (larghezza simile all'altezza) ed i tubi di flusso non hanno una portata costante. Ad ogni

modo questa ricostruzione del reticolo di flusso generata numericamente dal computer è realistica poiché soddisfa l'equazione del flusso delle acque sotterranee. Per esempio in un acquifero a conducibilità idraulica costante le linee equipotenziali generate dal computer, intersecano le linee di flusso perpendicolarmente. Le maglie di flusso calcolate numericamente vengono di solito utilizzate per evidenziare le distribuzioni del flusso piuttosto che per calcolare le portate, dato che queste vengono calcolate risolvendo numericamente le equazioni per il flusso idrico sotterraneo.

Una maglia di flusso si può disegnare anche per una situazione di flusso bidimensionale in pianta. Un'ipotesi importante per questo tipo di ricostruzione è l'assenza di una ricarica areale, come può essere quella da infiltrazione di piogge. La **Figura 4** mostra la ricostruzione in pianta per un campo di moto tra un lago ed uno stagno in una zona delimitata tra due affioramenti rocciosi. Se la ricarica è trascurabile rispetto alla portata entrante dal lago, allora il reticolo di flusso è sufficientemente preciso per rappresentare il sistema.

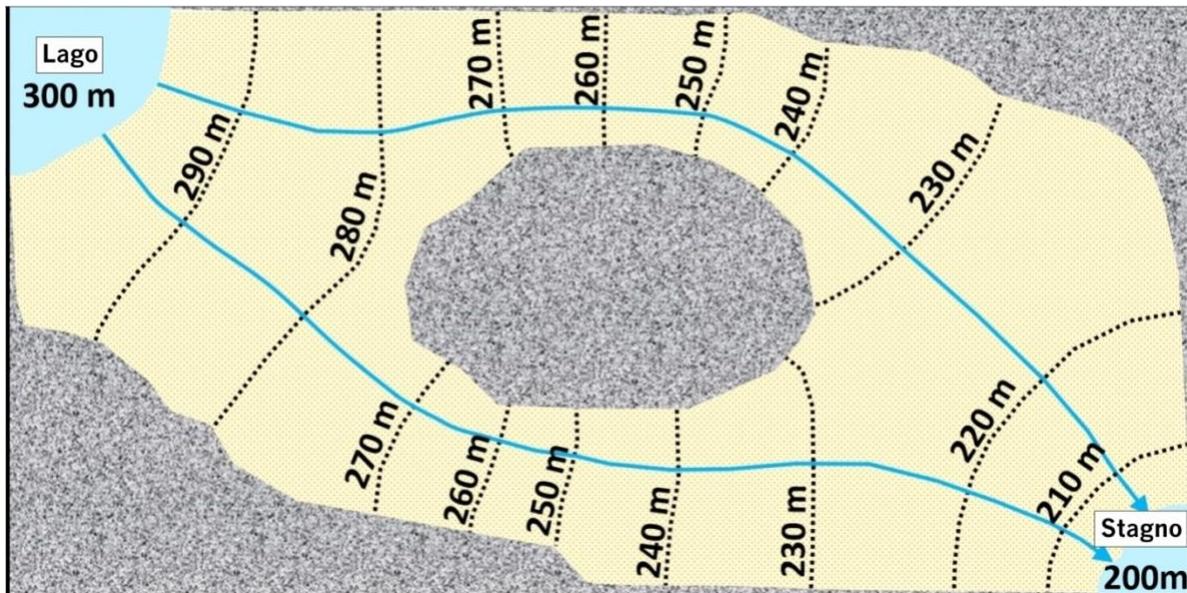


Figura 4 - Vista in pianta del flusso idrico per un acquifero confinato tra un lago profondo ed uno stagno e lateralmente limitato da due affioramenti rocciosi (impermeabili). La quota del lago è 300 m e quella dello stagno 200 m. Il tetto dell'acquifero è 190 m. Le linee di flusso divergono a monte dell'isola rocciosa, nel mezzo dell'acquifero, e convergono a valle.

2 Costruzione del Reticolo di Flusso

2.1 Metodi per la Costruzione dei Reticoli di Flusso

Vari sono i metodi per disegnare un reticolo di flusso. Tutti comunque producono un sistema di linee equipotenziale e linee di flusso. Il metodo grafico produce un risultato sufficientemente preciso in molti casi pratici. Il metodo numerico è più versatile, ma richiede la conoscenza del programma di calcolo.

Costruzione Grafica: Il metodo richiede carta, matita e la comprensione delle proprietà dei reticoli di flusso. In caso di situazioni non ideali come l'eterogeneità e l'anisotropia, la situazione è complessa ed il ricorso ai modelli numerici è la soluzione migliore. La procedura per costruire graficamente i reticoli di flusso è spiegata alla Sezione 2.2.

Metodo degli Elementi Analitici: L'approccio è utilizzato con sistemi più complessi e richiede computer e software. Un codice numerico risolve le equazioni del flusso idrico sotterraneo per i carichi idraulici e la funzione di corrente (stream function) per produrre sia le linee equipotenziali che di flusso in ogni punto del dominio di studio.

Approccio Numerico: Questa procedura richiede anch'essa computer e software. Gli approcci numerici possono essere utilizzati per i sistemi più complessi. I modelli numerici si possono preparare velocemente per costruire reticoli bidimensionali in condizioni di equilibrio e forniscono delle soluzioni discrete (non continue) per i carichi piezometrici in alcuni punti del dominio. Una soluzione più precisa richiede punti molto ravvicinati per il calcolo dei carichi. L'unico modo per sapere se la griglia è adatta è quello di risolvere lo stesso problema con una griglia a maglie più fini e confrontare i risultati per vedere se sono simili a quelli ottenuti con la maglia più grossolana. Dopo avere ottenuto la distribuzione per punti discreti del carico idraulico, si ricorre ad un codice di calcolo per il flusso delle particelle (un modello di tracciamento delle particelle) che disegna le linee di flusso rispettando la legge di Darcy.

Sebbene i modelli al computer si possano utilizzare per simulare sistemi di flusso complessi, è comunque utile per il professionista idrogeologo acquisire una certa abilità nel disegnare i reticoli di flusso con carta e matita sia per comprenderli meglio che per migliorare le conoscenze di base del flusso idrico sotterraneo. L'abilità nello schematizzare il campo di moto è di supporto per una veloce valutazione iniziale in campagna e nel caso di riunioni tecniche non programmate. Si deve sottolineare comunque che essere in grado di predisporre un modello numerico rappresenta una conoscenza fondamentale per un idrogeologo dei nostri giorni.

2.2 Disegno del Reticolo di Flusso per un Mezzo Omogeneo ed Isotropo

2.2.1 Criteri Fondamentali per Tracciare un Reticolo di Flusso

- La Legge di Darcy è valida
- Il mezzo è omogeneo per la conducibilità idraulica
- Il mezzo è isotropo per la conducibilità idraulica
- Il mezzo è completamente saturo
- Il regime di flusso è in equilibrio
- Il fluido ha una densità costante
- Il fluido ha una viscosità costante
- Gli assi verticale ed orizzontale hanno la stessa scala.

2.2.2 Fasi Costruttive del Reticolo di Flusso con Carta e Matita

1. Disegnare il contorno del sistema di flusso in scala indicando la natura di ogni limite
2. Disegnare le equipotenziali lungo i confini per ogni singolo valore di carico idraulico specificato lungo il confine
3. Disegnare le linee di flusso lungo i limiti impermeabili
4. All'interno del sistema di flusso, disegnare le linee di flusso nelle direzioni dove si prevede lo scorrimento idrico, curando che siano normali alle linee equipotenziali
5. Disegnare le linee equipotenziali nel sistema di flusso facendo attenzione che:
 - siano perpendicolari ai limiti impermeabili;
 - siano perpendicolari alle linee di flusso; e,
 - insieme a queste, formino una maglia quadrangolare con lati di dimensioni simili e leggermente curvi (quadrilateri curvilinei). Un quadrilatero curvilineo è una forma geometrica caratterizzata da quattro lati leggermente curvi con rapporto larghezza-altezza vicino ad uno.
6. Calcolare l'equidistanza e segnare il valore delle equipotenziali
7. Calcolare il flusso attraverso la maglia tramite l'equazione per la portata di un reticolo di flusso presentata alla Sezione 2.4, dopo la descrizione per costruire il reticolo di flusso.

2.3 Disegno del Reticolo di Flusso al di sotto di una Barriera Impermeabile

Vediamo le varie fasi per disegnare un reticolo di flusso in un mezzo sabbioso omogeneo al di sotto di una barriera impermeabile di cemento innestata nella sabbia come mostrato in **Figura 5**. La figura mostra solo una porzione della situazione di campagna, in realtà il terreno poroso di fondazione si estende molto di più sia a monte che a valle della diga. La diga è larga 21 m nel senso perpendicolare al foglio. La quota di riferimento è lo strato a bassa permeabilità alla base dell'acquifero. Il livello idrico del serbatoio a sinistra è

situato 10 m sopra il piano di riferimento (datum). Il livello idrico a valle della diga, a destra, è 4 m più basso di quello a monte e mantenuto costante da uno scarico.

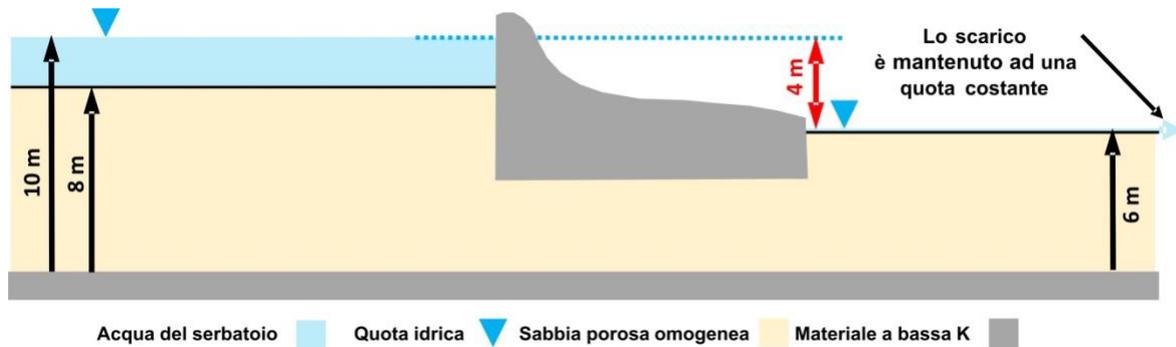


Figura 5 - Una diga in cemento innestata nel terreno.

Iniziamo a costruire il reticolo di flusso col disegnarne i confini e la natura (Figura 6). La diga in cemento e lo strato alla base della sabbia non sono attraversati dal flusso e quindi sono indicati come limiti impermeabili, flusso zero (Figura 6). Ogni livello può essere utilizzato come piano di riferimento per il reticolo di flusso. Nel nostro caso il letto orizzontale impermeabile al di sotto della diga costituisce un comodo piano per le misure di carico idraulico. Il corpo idrico è in condizioni idrostatiche e quindi i carichi idraulici al fondo del serbatoio, sulla sabbia, ed alla sua superficie sono uguali. Superficie del bacino e fondo sono pertanto limiti a carico costante pari a 10 m, a monte della diga e 6 m a valle (Figura 6). Le zone laterali, dell’acquifero non sono delimitate e quindi vanno disegnate abbastanza distanti dalla diga in modo che nella parti più esterne e lontane non vi sia un drenaggio importante tra il bacino e la sabbia sottostante. La maggiore intensità di filtrazione nella sabbia è subito a monte della diga e diminuisce con la distanza. Nel caso in cui ci si accorga che il disegno non è abbastanza grande, può essere rifatto ampliandolo lateralmente fino ad ottenere un reticolo congruente. Considerando la Legge di Darcy e sapendo che il flusso è parallelo ai limiti impermeabili, una prima linea di flusso si può disegnare lungo la fondazione della diga, dal bacino a monte fino a quello a valle (Figura 6).

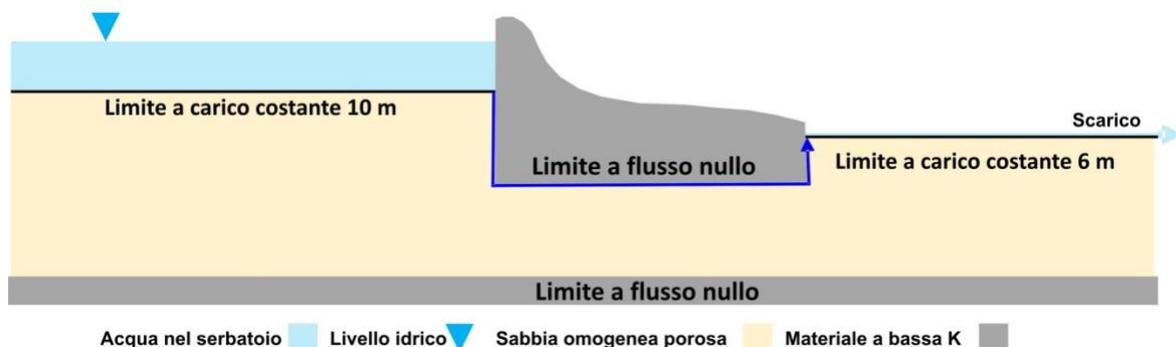


Figura 6 - Step 1 – Disegnare il sistema in scala (i limiti a flusso nullo sono in grigio). Step 2 – Disegnare le equipotenziali a coincidere con i limiti a carico fisso (linee nere in grassetto), Step 3 – Disegnare le linee di flusso a coincidere con i limiti a flusso nullo (freccie blu che seguono il bordo impermeabile della diga).

Il prossimo step è quello di immaginare come l'acqua si sposta nel sistema disegnando alcune linee di flusso. (**Figura 7**). Le linee di flusso vanno disegnate normali ai limiti a carico fisso. Non preoccuparsi troppo se i primi tentativi nello schematizzare le linee di flusso non sono precisi dato che questi errori si evidenziano quando si tracciano le equipotenziali e si possono correggere cancellando e ridisegnando fino ad ottenere un reticolo congruente. Il primo schizzo delle linee di flusso serve solo per poter iniziare.

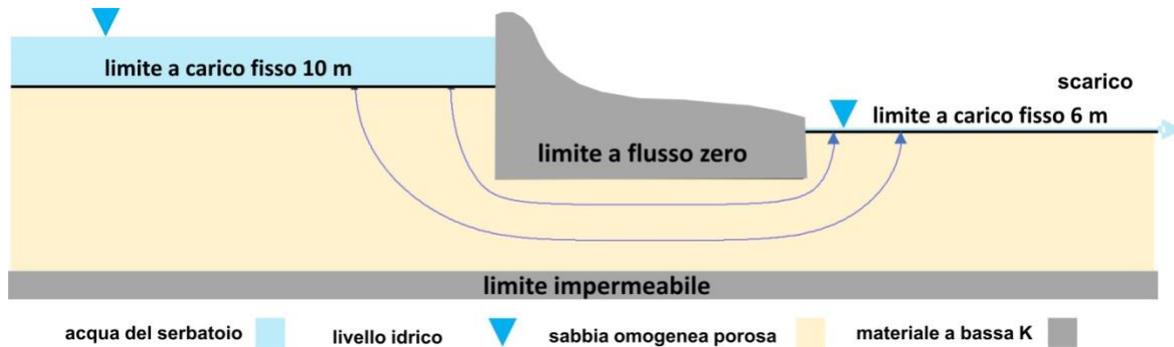


Figura 7 - Step 4: Disegnare le linee di flusso dove si ipotizza che scorra l'acqua sotterranea (frecche blu), accertandosi che siano normali alle equipotenziali ai limiti. Non preoccuparsi se non si ottiene la perpendicolarità subito. La costruzione dei reticoli di flusso è un processo iterativo. Acquisendo esperienza si affina anche l'intuizione e diventa poi semplice piazzare le linee di flusso al posto giusto ed ai primi tentativi.

Disegnare quindi le equipotenziali facendo vedere come il carico idraulico varia dal limite a carico fisso nel serbatoio a monte a quello nel serbatoio a valle. Le equipotenziali devono essere disegnate perpendicolari ai limiti a flusso nullo ed alle linee di flusso. Sia le equipotenziali che le linee di flusso intersecandosi, formano un reticolo a maglie quadrangolari con i lati curvilinei e rapporto larghezza-lunghezza vicino a 1. La procedura per disegnare i reticoli di flusso è iterativa, perché le equipotenziali e le linee di flusso vanno modificate continuamente fino ad ottenere dei quadrilateri con lati curvilinei. Può aiutare inserire dei cerchi tangenti ai lati all'interno di ogni maglia del reticolo. Se non sono circolari, come nei primi tentativi mostrati in **Figura 8**, bisogna modificare il reticolo.

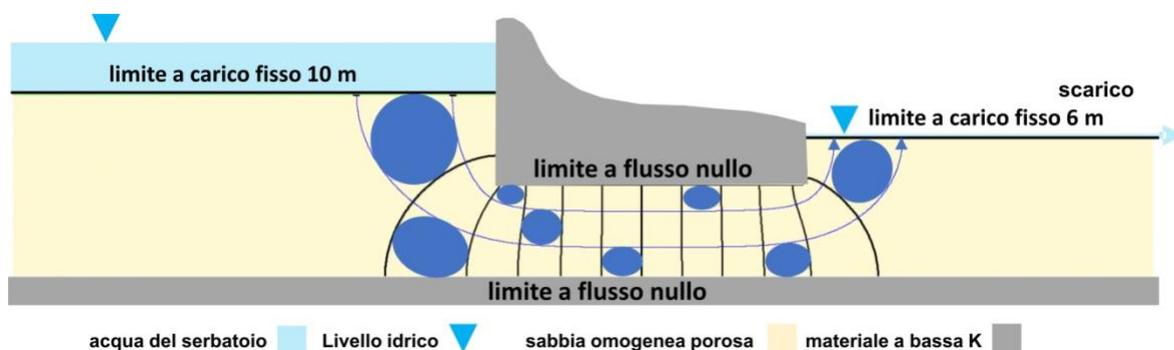


Figura 8 - Step 5: Disegnare le linee equipotenziali tra le linee nere più grosse alle estremità del sistema, che indicano i limiti a carico fisso, facendo attenzione che siano normali ai limiti a flusso nullo e alle linee di flusso, ed allo stesso modo che formino dei quadrilateri con lati curvi. Questo processo è iterativo e per ottenere il reticolo quadrangolare con maglie a lati curvilinei c'è bisogno di continue modifiche. Può essere utile inserire dei cerchi tangenti internamente ai lati nelle maglie. Se questi sono anche leggermente ellittici, come succede ai primi tentativi, bisogna rimodificare il disegno.

Aggiustare il reticolo linee di flusso–equipotenziali fino a che i cerchi riempiono quasi completamente l'interno delle maglie come in **Figura 9**. Se si ottiene un'ellisse allora non si tratta di un quadrangolo a lati curvilinei. Non preoccupiamoci troppo per qualche lieve imprecisione. Per essere importante ai fini del calcolo della portata nel sistema di flusso, l'errore deve essere tale da richiedere l'aggiunta o la cancellazione di linee equipotenziali o di flusso ai fini di ottenere la maglia quadrangolare. Riuscire ad ottenere un rapporto soddisfacente tra linee di flusso ed equipotenziali è la parte fondamentale della costruzione dei reticoli di flusso. Nelle Figure 8 e 9 il numero delle linee di flusso è lo stesso, ma quello delle equipotenziali è diverso. Questo indica che è stata necessaria una modifica per ottenere un calcolo più corretto della portata di flusso.

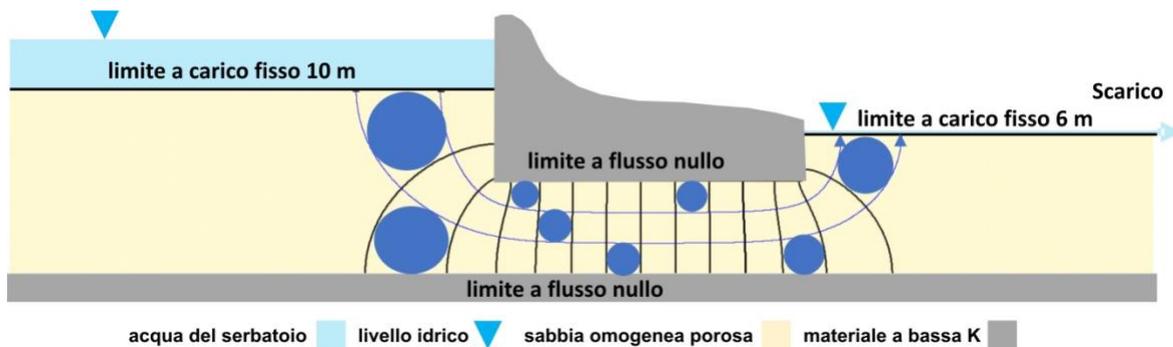


Figura 9 - Costruire delle maglie con uguale proporzione è molto importante quando si vuole disegnare un reticolo di flusso. Il metodo migliore è di ottenere dei quadrilateri con lati curvilinei. Inserire un cerchio all'interno di ogni maglia aiuta a capire se essa può essere considerata un quadrangolo a lati curvilinei. Qualche piccolo errore non è importante, a meno che non sia così grande da richiedere l'aggiunta o la cancellazione di linee di flusso od equipotenziali per ottenere il reticolo richiesto, come tra le due figure precedenti.

Ottenuta la versione finale, la prossima fase è quella di calcolare i valori delle equipotenziali indicandoli. Le equipotenziali rappresentano i carichi idraulici nel sistema tra quelli più esterni. La differenza di carico idraulico tra due equipotenziali vicine è l'equidistanza. Questo intervallo è costante in tutto il sistema di flusso. Per ottenere l'equidistanza calcolare prima la differenza complessiva di carico idraulico, H , e quindi dividerla per il numero di intervalli tra le equipotenziali, n_d , (salti di gradiente), come nell'Equazione 1.

$$\text{equidistanza} = \frac{H}{n_d} \quad (1)$$

dove:

equidistanza = differenza di carico tra due equipotenziali adiacenti (L)

H = differenza di carico totale nel sistema di flusso (L)

n_d = numero di intervalli di equipotenziali nel sistema
(adimensionale)

La differenza complessiva di carico idraulico nel sistema è:

$$H = 10 \text{ m} - 6 \text{ m} = 4 \text{ m}$$

Un salto di carico è la zona tra due equipotenziali adiacenti. Il numero di intervalli non è arbitrario ma determinato dal reticolo ottenuto rispettando le regole sul posizionamento delle equipotenziali. Nel reticolo di flusso sotto la diga vi sono 14 salti di carico idraulico, ($n_d=14$) come indicato in **Figura 10**.

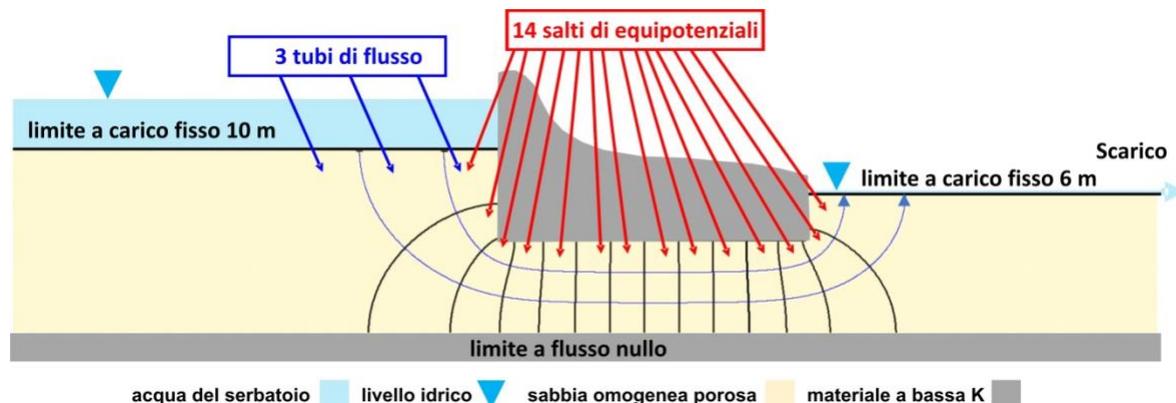


Figura 10 - Il numero corretto di intervalli di carico idraulico (lo spazio tra due equipotenziali adiacenti) e tubi di flusso (spazi tra le linee di flusso) si ottiene rispettando le regole di costruzione del reticolo di flusso. Quello in figura ha 14 intervalli tra le equipotenziali e 3 tubi di flusso.

Il disegno in figura è iniziato con due linee di flusso, ottenendo tre tubi di flusso al di sotto della diga. Un corretto reticolo di flusso si può ottenere iniziando con uno, dieci o qualunque altro numero di tubi di flusso, a patto di aggiungere anche un numero congruo di linee equipotenziali per ottenere una maglia di uguale proporzione e di preferenza quadrilateri con lati curvilinei. Non ha importanza il numero delle linee di flusso perché nel disegnare degli elementi quadrangolari con valori simili di lunghezza ed altezza, si ottengono rapporti simili tra numero di tubi di flusso e numero di salti di potenziale. Quello che è importante è, infatti, il rapporto tra tubi di flusso e salti di potenziale, che nella **Figura 10** vale $3/14 = 2.14$. Se il reticolo di flusso è disegnato con 2 tubi di flusso, servono 9 salti di potenziale per ottenere dei quadrilateri con lati curvilinei ed un rapporto $2/9 = 0.222$. Se invece utilizziamo 5 tubi di flusso vi saranno 23 salti di potenziale per ottenere un reticolo corretto col rapporto $5/23 = 0.217$. Queste piccole differenze che si ottengono nei rapporti tra numero di tubi di flusso e salti di potenziale dimostrano che la procedura grafica con carta e matita è solo approssimata.

L'equidistanza nel reticolo di flusso è:

$$\text{equidistanza} = \frac{H}{n_d} = \frac{4 \text{ m}}{14} = 0.2857 \text{ m}$$

La **Figura 11** mostra le equipotenziali ed il loro valore. I valori decimali indicati non stanno a significare un'elevata precisione, di due numeri dopo la virgola, ma servono solo ad illustrare le varie differenze di carico idraulico tra equipotenziali vicine.

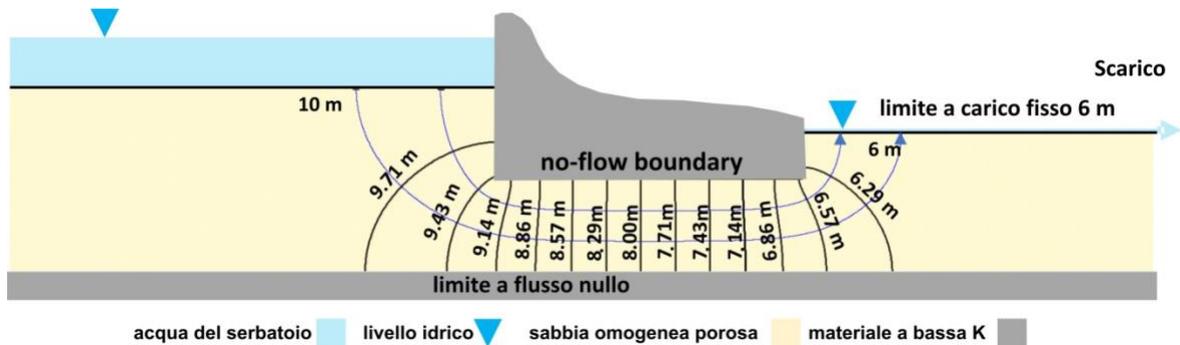


Figura 11 - Step 6: Calcolare l'equidistanza tra le equipotenziali ed indicarla. In questo caso l'equidistanza è ~0.29 metri.

Ricordiamo che la soluzione approssimata che si ottiene disegnando il reticolo di flusso a mano, è sufficiente in molti casi pratici dato che l'errore che si compie è certamente inferiore a quello associato all'incertezza nell'assumere il mezzo omogeneo, isotropo ed alla stima della conducibilità idraulica.

2.4 Calcolo della Portata

Per portata si intende il volume d'acqua che fluisce nel sistema. Questo valore è indicato in volume (lunghezza al cubo) su tempo (per esempio litri al minuto, metri cubi al secondo).

In un reticolo di flusso dove linee equipotenziali e di flusso formano dei quadrilateri si può utilizzare l'Equazione 2 per calcolare la portata che fluisce attraverso il campo di moto. L'equazione per calcolare il flusso attraverso il sistema è [spiegata nel Box 3](#) ↓

$$Q_{totale} = K H \frac{n_f}{n_d} w \quad (2)$$

con:

$$Q_{totale} = \text{portata attraverso il Sistema (L}^3/\text{T)}$$

$$K = \text{conducibilità idraulica del mezzo poroso (L/T)}$$

$$H = \text{differenza di carico complessiva nel campo di moto (L)}$$

$$n_f = \text{numero di tubi di flusso nel sistema (adimensionale)}$$

$$n_d = \text{numero di salti di potenziale nel sistema (adimensionale)}$$

$$w = \text{larghezza del mezzo oggetto del disegno (L)}$$

Come mostrato nella parte iniziale del Box 3, l'Equazione 2 può essere modificata per comprendere anche maglie con rapporto larghezza-altezza diverse (Equazione 3).

$$Q_{totale} = K H \frac{n_f}{n_d} w a_r \quad (3)$$

con:

a_r = rapporto costante delle dimensioni di una maglia nel campo di moto, calcolato come distanza tra linee di flusso vicine divisa per distanza tra equipotenziali vicine (adimensionale)

L'Equazione 2 si applica al reticolo di flusso con maglie a lati curvilinei in **Figura 11**. Supponiamo che la conducibilità idraulica del materiale sotto la diga, nella sezione precedente, sia 0.5 m/d e la larghezza della diga nella figura sia 21 metri, la portata sotto lo sbarramento è allora:

$$Q_{totale} = KH \frac{n_f}{n_d} w = \left(0.5 \frac{\text{m}}{\text{d}}\right) (4 \text{ m}) \left(\frac{3}{14}\right) (21 \text{ m}) = 9 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

La formula per calcolare la portata della rete di flusso non richiede le dimensioni assolute di lunghezza ed altezza del sistema. Essa utilizza solo il rapporto tra numero di tubi di flusso e salti di potenziale. Quando si disegna il campo di moto quello che è importante è appunto il rapporto tra numero di tubi di flusso e salti di potenziale. Nel caso della **Figura 11** questo rapporto è $3/14 = 0.214$. Se utilizziamo 2 tubi di flusso, avremo bisogno di 9 salti di potenziale per ottenere dei quadrilateri con alti curvilinei ed un rapporto di $2/9 = 0.2221$. Nel caso di 5 tubi di flusso avremo per lo stesso motivo, 23 salti di potenziale per ottenere i corrispondenti quadrilateri ed un rapporto di $5/23 = 0.217$. Queste piccole differenze dei rapporti tubi di flusso-salti di potenziale daranno valori leggermente diversi di Q_{totale} , a riprova che la costruzione grafica con carta e matita è solo approssimata. Quando vogliamo conoscere Q_{totale} , in un caso pratico, queste imprecisioni sono trascurabili se paragonate all'incertezza insita nella stima di un valore di conducibilità idraulica equivalente usata per ottenere il valore di Q_{totale} .

In certi casi si può iniziare a costruire il reticolo di flusso con un numero intero di salti di potenziale. Se la **Figura 11** riporta un'equidistanza delle isopotenziali di 0.25 m (con 16 salti di potenziale), sono necessari 3.43 tubi di flusso (pari a $3.43/16 = 0.214$). Il risultato è che il campo di moto ha un tubo di flusso parziale per mantenere il rapporto valido ed uno dei tubi di flusso ha una larghezza pari a 0.43 degli altri, come evidenziato dal tubo di flusso più profondo in **Figura 12**. Il calcolo della portata dà il valore già ottenuto perché il rapporto numero di tubi di flusso-salti di potenziale non è cambiato:

$$Q_{totale} = KH \frac{n_f}{n_d} w = \left(0.5 \frac{\text{m}}{\text{d}}\right) (4 \text{ m}) \left(\frac{3.43}{16}\right) (21 \text{ m}) = 9 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

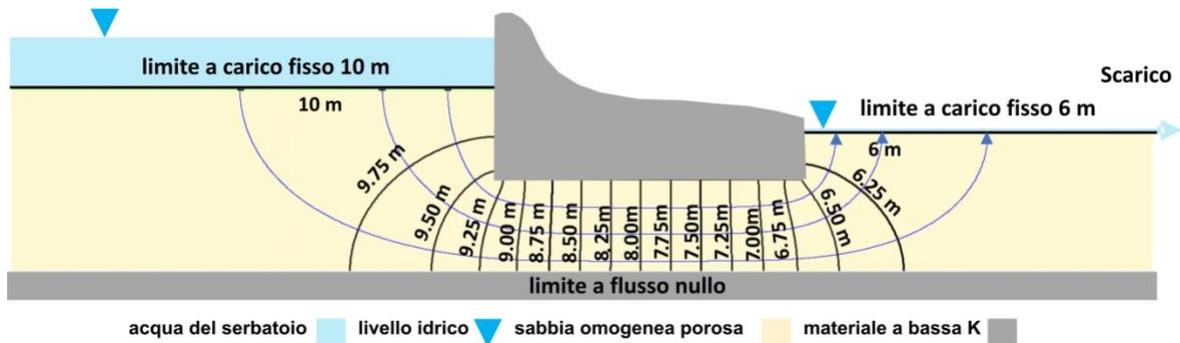


Figura 12 - Un campo di moto simile a quello in **Figura 11** ma con un'equidistanza delle isopotenziali di 0.25 metri che richiede 3.43 tubi di flusso per avere dei quadrilateri a lati curvilinei ed un valido rapporto tra numero di tubi di flusso e salti di potenziale. Si vede che il tubo di flusso più profondo è solo ~40% della larghezza di quelli superiori che formano i quadrilateri a lati curvilinei.

Ricordiamo che per disegnare un reticolo di flusso dobbiamo rapportare tutto in scala. In altre parole lunghezza e larghezza devono essere disegnate correttamente per ricavare la portata per distanza unitaria, normale al disegno. Dobbiamo conoscere la larghezza assoluta del sistema per ottenere poi la sua portata complessiva.

2.5 Costruzione di un Reticolo di Flusso in Acquifero Freatico con Limite Superiore corrispondente alla Tavola d'Acqua

Gli acquiferi freatici hanno un tipo di limite superiore che corrisponde alla tavola d'acqua e che richiede un approccio particolare quando si deve disegnare un reticolo di flusso. Il motivo è legato al fatto che la posizione di tale limite non è nota fino a quando non si completa la costruzione del disegno. Tali sistemi, inoltre, possono presentare una superficie di filtrazione attraverso la quale l'acqua sotterranea affiora da una sezione della superficie del terreno. La posizione della tavola d'acqua e la lunghezza della superficie di filtrazione, vanno modificati insieme alle linee di flusso ed alle equipotenziali durante il disegno del campo di moto. Dato che alla superficie della tavola d'acqua la pressione corrisponde a quella atmosferica le linee equipotenziali intersecano la superficie freatica ad una quota uguale al loro valore.

In assenza di ricarica, la superficie freatica corrisponde ad una linea di flusso. Non vi è flusso attraverso una linea di flusso ed una falda freatica senza ricarica può essere considerata come un limite a flusso nullo la cui posizione non è nota fino a quando non completiamo la costruzione del reticolo. In queste condizioni le linee equipotenziali sono perpendicolari alla superficie freatica.

Il metodo per costruire i reticoli di flusso non prevede limiti con flusso definito a parte lo zero. Nel caso in cui sia nota la posizione della falda freatica e vi sia una ricarica, i valori di carico idraulico sono corrispondenti alla quota della tavola d'acqua e si può disegnare un reticolo di flusso che indica questo ingresso di acqua nel sistema. Per calcolare la portata in ingresso è sufficiente conoscere la conducibilità idraulica del mezzo. Questo argomento è discusso alla sezione 2.9 dedicato al flusso regolato dalla topografia.

Utilizziamo l'esempio di una diga in terra per spiegare la costruzione dei reticoli di flusso in un acquifero freatico, come in **Figura 13** e descritto al Box 4 (vedi didascalie in **Figura 13**). A differenza della sezione precedente, il materiale al fondo è impermeabile ed il materiale utilizzato per la diga è recuperato nelle vicinanze ed in questo caso l'acqua filtra attraverso lo sbarramento invece che al di sotto. La parte superficiale della diga è impermeabilizzata per evitare infiltrazioni da acque superficiali (ricarica da piogge). Di conseguenza la tavola d'acqua corrisponde ad una linea di flusso.

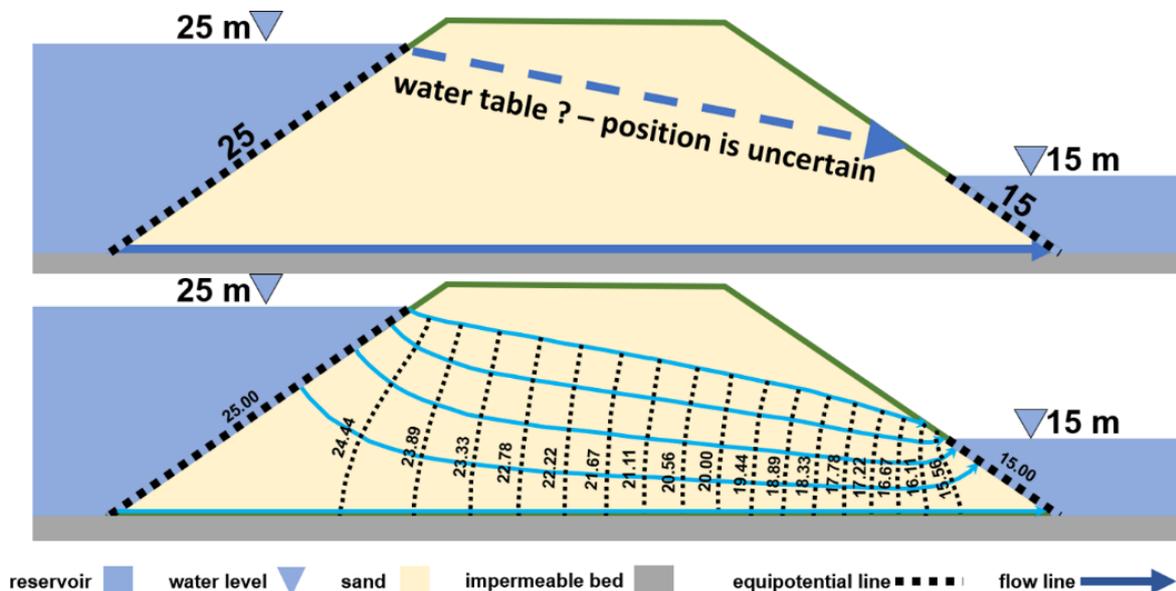


Figura 13 - [Click per il Box 4](#) che descrive il metodo per costruire un reticolo di flusso con limite corrispondente alla tavola d'acqua.

2.6 Il metodo “Leggi, Guarda, Agisci” applicato alla costruzione dei Reticoli di Flusso

Secondo il filosofo cinese Confucio (551 – 479 a.C.): “ Ascolto (*leggo*) e dimentico. Guardo e ricordo. Agisco ed imparo” La parola “*leggo*” tra parentesi è stata aggiunta per adattare la frase ai nostri tempi, 2500 anni dopo quelli di Confucio. In breve, secondo Confucio, impariamo più velocemente quando cerchiamo di osservare dentro le cose e quindi di praticarle. Le sezioni precedenti di questo libro danno l'opportunità di “ascoltare”(leggere).

Una possibilità di “visualizzare” i reticoli di flusso è quella dei filmati ripresi in una cella del tipo Hele-Shaw. Analogamente ad un reticolo di flusso, una cella Hele-Shaw rappresenta una sezione piana di un sistema di flusso. Una cella Hele-Shaw consiste di due pareti trasparenti parallele separate da una piccola distanza riempita da un liquido viscoso che si sposta a seguito di una differenza di pressione lungo le pareti. La geometria del flusso tra le due pareti equivale a quello dell'acqua sotterranea in planimetria.

Un modello Hele-Shaw permette di vedere le linee di flusso ma non le equipotenziali che invece dobbiamo cercare di immaginare. I filmati del flusso in un modello Hele-Shaw si

possono vedere accedendo ai link in **Figura 14**. Il primo video, **Figura 14a**, illustra il flusso in un sistema simile a quello mostrato nel link di **Figura 15** che mostra come disegnare un reticolo di flusso. Il secondo video, **Figura 14b**, mostra un sistema di flusso con ricarica dalla superficie e recapito da entrambi i lati. Il terzo video, **Figura 14c**, è analogo al secondo ma la parte sinistra è inizialmente chiusa e tutto il flusso fuoriesce verso destra. All'incirca verso la metà del video 14c, la parte destra rimane chiusa e quella sinistra si apre permettendo di vedere lo spostamento delle linee di flusso.

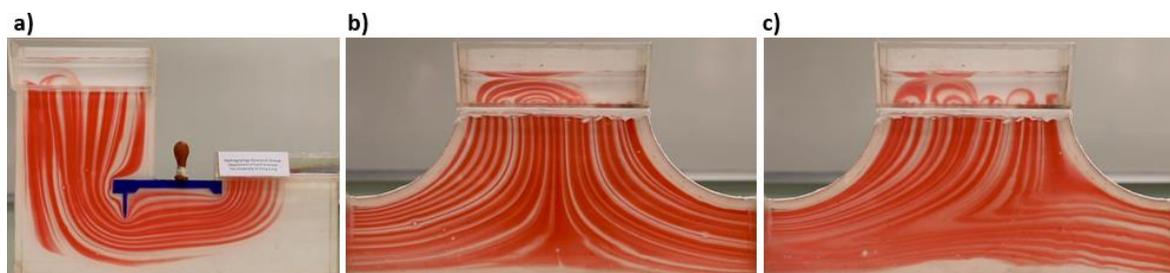


Figura 14 - Le celle del tipo Hele-Shaw mostrano le linee di flusso sotto una diga a) [Click per vedere](#), flusso di ricarica dalla riva di un corso d'acqua, b) [Click per vedere](#), flusso di ricarica dalla riva di un corso d'acqua dapprima verso il lago a destra, poi verso quello a sinistra, c) [Click per vedere](#). (- Simulazione di un modello Hele-Shaw all'Università di Hong Kong, J. Jiao e W.Z. Liang. Editing e voce di Eileen Poeter).

Un'altra opportunità di "vedere" i reticoli di flusso è quella di un video che riprende il disegno di un campo di moto con carta e matita a cui si può accedere tramite il link in **Figura 15**. Il filmato mostra come la procedura di disegno del reticolo di flusso consista in continui tentativi e come sia utile avere sempre a disposizione una gomma.

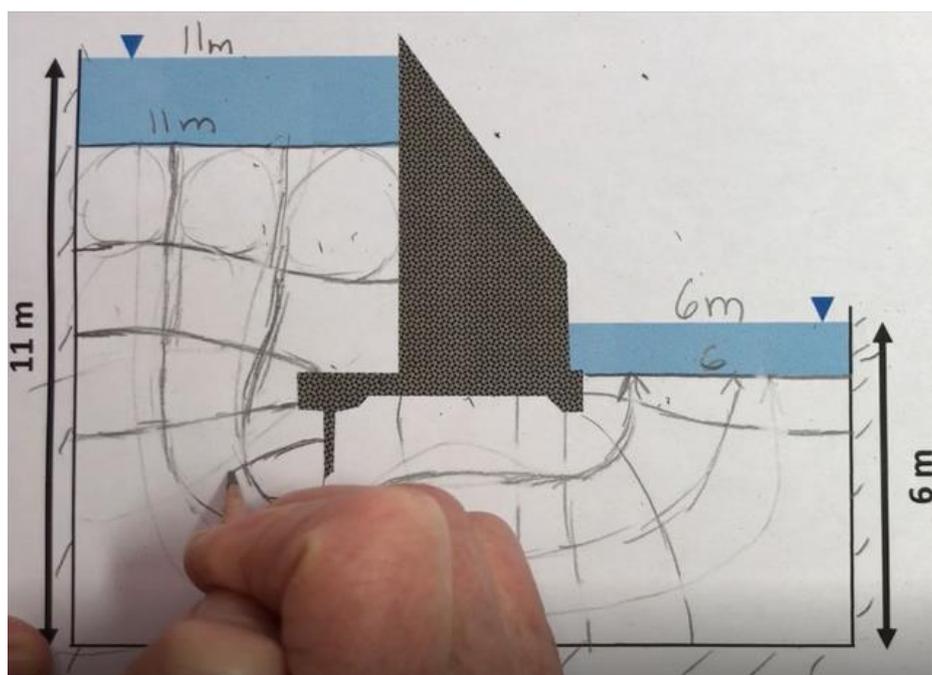


Figura 15 - [Click per vedere](#) un video sulla costruzione di un reticolo di flusso.

Come ha detto Confucio, si apprende con "l'azione". L'esercizio della costruzione dei reticoli di flusso è pertanto molto utile quando si cerca di apprendere le modalità del

flusso idrico sotterraneo. Il fatto di disegnare di persona porta l'attenzione verso certi aspetti del sistema di flusso che possono sfuggire a chi è nuovo a questo argomento, e quindi chiarire alcuni concetti idrogeologici. Gli esercizi nella Sezione 3 permettono di disegnare alcuni campi di moto e visualizzarli nella loro versione finale.

2.7 I Reticoli di Flusso Forniscono Spunti di Apprendimento sul Flusso Idrico Sotterraneo

Tutti noi abbiamo già visto l'acqua che esce in pressione da un tubo e sappiamo che riducendo il foro di uscita col dito la portata rimane la stessa ma la velocità dell'acqua aumenta. Questo concetto intuitivo di conservazione della massa si applica all'interpretazione del flusso nelle condotte. Come nell'esempio precedente un tubo di flusso ha una portata costante. Se la sezione del tubo si restringe, la sua velocità (portata divisa per sezione di passaggio) deve aumentare. In un mezzo omogeneo, la Legge di Darcy stabilisce che un aumento del gradiente idraulico determina un aumento della velocità (portata specifica, $v = Ki$). Ne consegue che in un mezzo omogeneo, quando un tubo di flusso si restringe, le linee equipotenziali si avvicinano. Se la porosità efficace (m_e) è uniforme, un aumento di portata specifica (*) ($v = Ki$) implica anche un aumento della velocità effettiva di flusso ($v_e = Ki/m_e$).

I concetti precedenti sono illustrati dai due sistemi di flusso in **Figura 16**. In entrambi i casi l'acquifero confinato ha uno spessore di 100 m con il tetto a quota 0 m. La conducibilità idraulica è omogenea e pari a 0.0002 m/s. L'acqua si infiltra da tutto il lato sinistro con portata di 0.2 m³/s ed esce da uno scarico ridotto sulla parte destra, dove il carico idraulico è pari a 10 m.

() da non confondere con la portata specifica dei pozzi in pompaggio (Q_s), data dal rapporto tra la portata prelevata ed il corrispondente abbassamento pseudostabilizzato ($Q_s = Q/ds$), in inglese chiamata *Specific Capacity* (n.d.T.).*

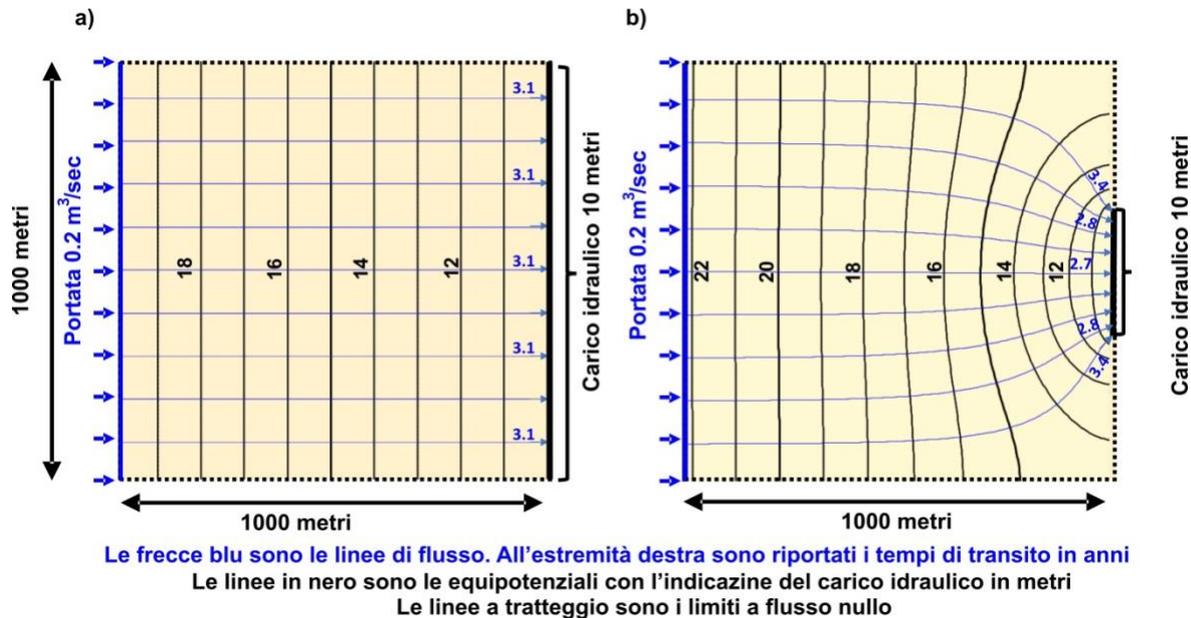
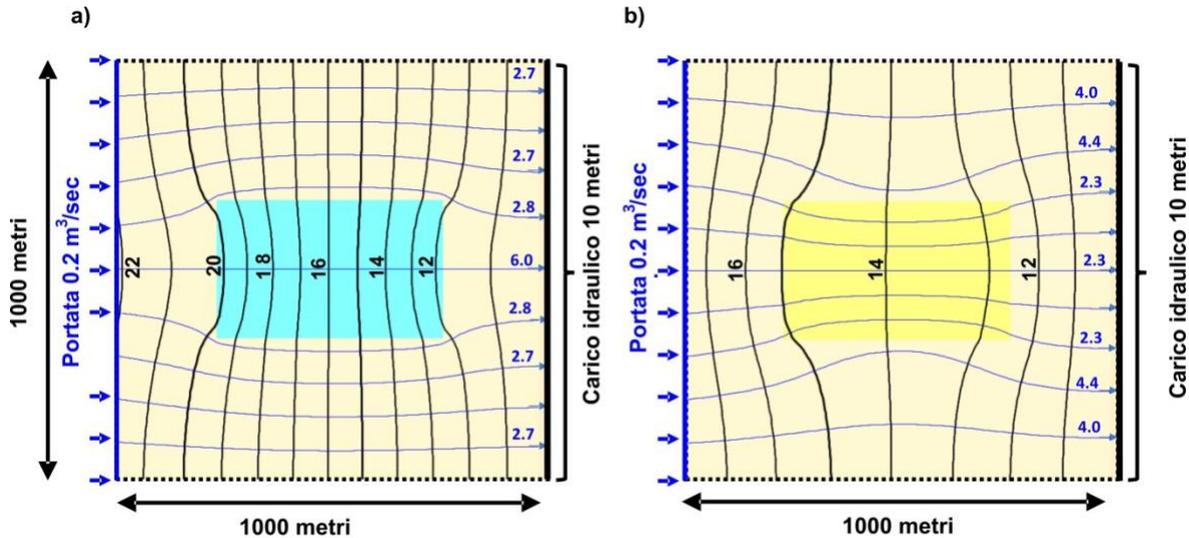


Figura 16 - Le due figure si riferiscono a sistemi omogenei e l'acqua entra con portata costante lungo tutto il lato sinistro sia in a) che in b), ma in b) la sezione di scarico sulla destra è minore. Per mantenere costante la portata attraverso la sezione ridotta in b) i tubi di flusso devono restringersi ed il gradiente aumentare rispetto ad a). Questo porta ad un aumento della portata specifica e della velocità effettiva (portata specifica divisa per porosità) vicino allo scarico b). I tempi di percorrenza sono ~3.1 anni nel caso a) mentre sono inferiori per le linee di flusso centrali del sistema b) (<3 anni) e maggiori per le linee di flusso vicino ai limiti (>3 anni).

Nella **Figura 16a**, la zona di scarico si estende a tutta la parte destra, col risultato di avere tubi di flusso dritti ed uniformi. Nella **Figura 16b**, lo scarico è ridotto ad una porzione minore del lato destro. Per uscire dall'acquifero i tubi di flusso si restringono vicino all'uscita. Questo restringimento della sezione è accompagnato da un aumento del gradiente idraulico (le linee equipotenziali sono più ravvicinate) in accordo con la Legge di Darcy. Le linee equipotenziali vanno da 10 a 21 metri ed il loro valore è indicato in nero.

Il tempo di transito lungo i tubi di flusso è indicato dai numeri in colore blu vicino all'estremità con la freccia della linea di flusso. I tempi sono 3.1 anni dalla zona di entrata (sinistra) a quella di uscita (destra) per tutti i volumi d'acqua che attraversano il sistema con uno scarico completamente libero (**Figura 16a**). La stessa portata deve passare attraverso la sezione ridotta, ma in questo caso i tubi di flusso centrali trasportano volumi d'acqua in un tempo minore ~2.7 anni, mentre invece il flusso vicino ai limiti è più lento e richiede 3.4 anni per raggiungere l'uscita (**Figura 16b**).

In un mezzo eterogeneo non si può disegnare graficamente un reticolo di flusso, si ricorre pertanto ad una simulazione numerica per dimostrare l'impatto di una lente con conducibilità idraulica più bassa e più alta sul sistema della **Figura 16a**, come mostrato nella **Figura 17**. Nella **Figura 17**, come nella **Figura 16**, nell'acquifero la stessa portata entra da sinistra ed esce a destra. L'esempio di mezzo eterogeneo ha una zona a bassa K nell'acquifero di **Figura 17a** ed una ad alta K in quello di **Figura 17b**.



Le frecce blu sono le linee di flusso. All'estremità destra sono riportati i tempi di transito in anni
Le linee in nero sono le equipotenziali con l'indicazione del carico idraulico in metri
Le linee a tratteggio sono i limiti a flusso nullo

Figura 17 - La portata in ingresso è la stessa per questi due esempi in mezzo eterogeneo, come per quello omogeneo in **Figura 16**. a) Nella zona a bassa K i tubi di flusso sono più larghi ed il gradiente maggiore (le equipotenziali sono più vicine tra loro) che non nella zona vicina con K maggiore. Le particelle fluide impiegano più tempo per spostarsi nella zona a bassa K. b) Nella zona con K maggiore (a destra), i tubi di flusso sono più stretti ed il gradiente minore (le equipotenziali sono più distanziate) che non nella zona vicina con K minore. Le particelle fluide si spostano più velocemente nella zona con K più elevata.

I tubi di flusso trasportano gli stessi volumi in ogni punto lungo il percorso, e nel caso della zona a bassi valori di K (**Figura 17a**): (1) I tubi di flusso si allontanano quando entrano nella zona a bassa K e si avvicinano all'uscita, e (2) le equipotenziali sono più ravvicinate nella zona a bassa K che non al di fuori. Entrambi questi cambiamenti sono ricavabili dalla Legge di Darcy, dato che un gradiente ed un'area maggiore servono per trasportare gli stessi volumi quando il tubo di flusso entra nella zona a bassa K. In sintesi, il sistema con K minore richiede un gradiente maggiore per trasportare gli stessi volumi attraverso l'acquifero (notare che i carichi idraulici a sinistra in **Figura 17a** sono più alti di quelli in **Figura 16a**). Le particelle fluide sono più rapide nel mezzo con K maggiore che circonda il materiale a K minore. Tutto questo è indicato dal tempo di transito di una particella fluida nella zona centrale, più del doppio di quello corrispondente al mezzo con K minore nella fascia più esterna (6 anni rispetto a 2.7 anni). E' interessante ricordare che, in questi esempi, la portata che entra nel sistema da sinistra, è la stessa. Se invece di una portata costante a sinistra manteniamo costante il carico idraulico, la **Figura 17a** avrebbe una portata inferiore che non in **Figura 16a**, ma la forma delle linee di flusso in **Figura 17a** sarebbe simile, con linee divergenti a monte della zona a bassa K e convergenti a valle.

I tubi di flusso trasportano gli stessi volumi in ogni punto lungo il loro percorso, e nel caso della zona ad alta K (**Figura 17b**): (1) I tubi di flusso si avvicinano quando entrano nella zona a K maggiore e si allontanano all'uscita e (2) le linee equipotenziali sono più distanziate nella zona ad alta K che non all'uscita. Entrambi questi cambiamenti sono ricavabili dalla legge di Darcy dato che un gradiente ed un'area minore sono necessari per trasportare gli stessi volumi quando il tubo di flusso entra nella zona a K maggiore. In

sintesi il sistema con K più elevato richiede un gradiente minore per trasportare gli stessi volumi attraverso l'acquifero (notare che i carichi idraulici in **Figura 17b** sono minori di quelli in **Figura 16a**). Le particelle fluide sono più lente nel mezzo a K minore che circonda il materiale a K maggiore ed al contrario sono più veloci nell'attraversare il mezzo con K maggiore ed in corrispondenza della fascia centrale. Tutto questo è indicato dal tempo di transito della particella fluida lungo la linea di flusso centrale nella zona ad alta K (2.3 anni rispetto a 4.4 anni). E' interessante ricordare che, in questi esempi, la stessa portata entra nei due sistemi dal lato sinistro. Se invece di una portata costante a sinistra manteniamo costante il carico idraulico, il sistema di **Figura 17b** avrebbe una portata maggiore di quella in **Figura 16a**, ma la forma dei tubi di flusso in **Figura 17b** sarebbe simile con linee convergenti a monte della zona con K elevato e divergenti a valle.

2.8 Costruzione di un Reticolo di Flusso in un Mezzo con Conducibilità Idraulica Anisotropa

In un sistema anisotropo, la conducibilità idraulica varia con la direzione. Questo si verifica più spesso nelle strutture tipo bacino di sedimentazione costituiti da strati di materiale sedimentario a diversa conducibilità idraulica. In questi materiali stratificati, l'acqua sotterranea ha uno scorrimento prevalente parallelo agli strati ed in quelli a maggiore conducibilità idraulica. In questo modo il flusso incontra una resistenza inferiore che non nella direzione verticale, quando deve spostarsi tra strati ad alta e bassa conducibilità. Nei mezzi stratificati con diversi valori di conducibilità idraulica, la conducibilità equivalente normale agli strati è più bassa di quella parallela agli strati. . Questa parte è discussa in un altro [libro di Groundwater Project](#) [↗] (Woessner e Poeter, 2020) dove viene spiegata una procedura per calcolare la conducibilità idraulica equivalente con flusso verticale e parallelo agli strati.

La costruzione grafica di un reticolo di flusso va adottata per un mezzo isotropo. Si può comunque ottenere un reticolo di flusso per un materiale anisotropo mediante i seguenti accorgimenti: 1) trasformare la geometria del sistema in uno equivalente isotropo; 2) disegnare il reticolo di flusso per un sistema isotropo; e, 3) rimodificare il reticolo di flusso per portarlo alla geometria di un sistema anisotropo. In un sistema anisotropo che deriva da una stratificazione orizzontale, la trasformazione geometrica consiste nel ridimensionare l'asse verticale z di un fattore pari alla radice quadrata del rapporto K_x/K_z , come indicato in **Figura 18a** e **b**, oppure ridimensionare l'asse orizzontale x di un fattore pari alla radice quadrata di K_z/K_x . Le istruzioni dettagliate per disegnare un reticolo di flusso in un mezzo con conducibilità idraulica anisotropa si trovano al Box5 indicato in **Figura 18**. La trasformazione si può applicare sia con reticoli di flusso rappresentati in pianta che in sezione. In un sistema anisotropo, le linee di flusso e le equipotenziali non si intersecano a 90° come indicato in **Figura 18c**.

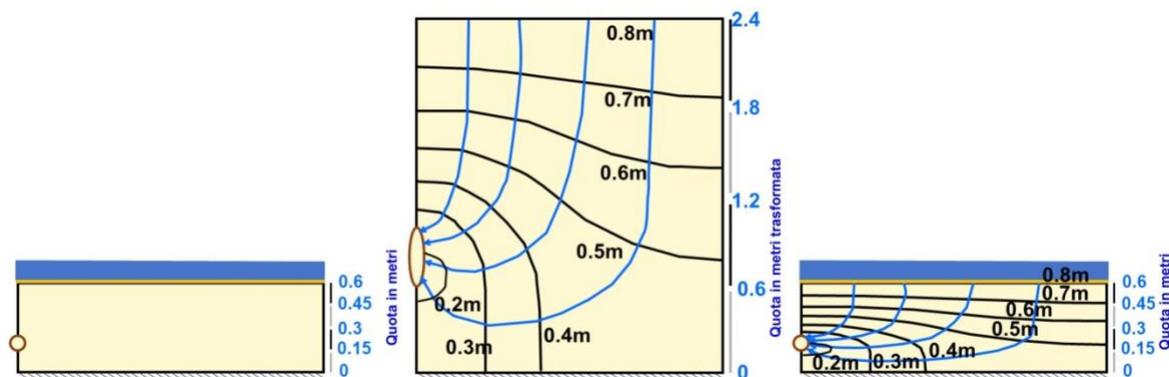


Figura 18 - [Click per vedere il Box 5](#) che illustra la procedura dettagliata per disegnare il reticolo di flusso in mezzi anisotropi. Disegno di reticolo di flusso anisotropo: a) Geometria del sistema di flusso; b) Sistema di flusso trasformato, con il reticolo di flusso disegnato per condizioni isotrope; c) Sistema di flusso riportato alla geometria iniziale ma con reticolo di flusso per un mezzo anisotropo.

2.9 Costruire e Studiare Sistemi di Flusso Regolati dalla Topografia

Il programma chiamato “TopoDrive” può essere utilizzato per costruire e simulare sistemi di flusso regolati dalla topografia. Il sistema di flusso è una sezione verticale con limiti a flusso nullo a sinistra, destra e sul lato inferiore. Il limite superiore è la falda freatica con valore specificato dall’utente. Questo sistema di flusso è diverso da quelli incontrati in precedenza, in due aspetti. Dapprima, nel caso del flusso sotto uno sbarramento impermeabile (Sezione 2.3, **Figura 11**), il carico idraulico è uniforme lungo il fondo del bacino a monte (10 m) e quello a valle (6 m). Al contrario nel sistema influenzato dalla topografia, il carico idraulico lungo la superficie d’acqua di falda è uguale alla quota della falda e quindi può variare lungo il limite (a meno che la falda non sia piatta). Per quanto riguarda il secondo aspetto, nel caso di flusso per acquifero libero (Sezione 2.5, Box 4), la posizione della falda freatica è inizialmente sconosciuta e viene determinata mentre il reticolo di flusso viene disegnato. Qui, nel sistema di flusso regolato dalla topografia, la posizione della falda è specificata. Data questa quota della falda, per soddisfare la Legge di Darcy e conservare la massa, l’acqua deve fluire attraverso la superficie freatica entro o fuori dal sistema.

Il programma TopoDrive utilizza un modello numerico per risolvere le equazioni del flusso, quindi disegna le equipotenziali su tutto il sistema e con equidistanza costante. Dopo avere disegnato le equipotenziali, l’utente seleziona uno o più punti, partendo dai quali il programma tratterà le linee di flusso. Poiché le linee di flusso partono da punti arbitrari scelti dall’utente, i tubi di flusso probabilmente non portano gli stessi volumi idrici.

La **Figura 19** fornisce il link al video che illustra l’utilizzo di TopoDrive. Per le istruzioni scritte sull’utilizzo di TopoDrive, [click qui per il Box 6](#). Per accedere alla versione online di TopoDrive collegarsi a <http://tdpfonline.net>, dove i lettori possono costruire i propri sistemi di flusso.

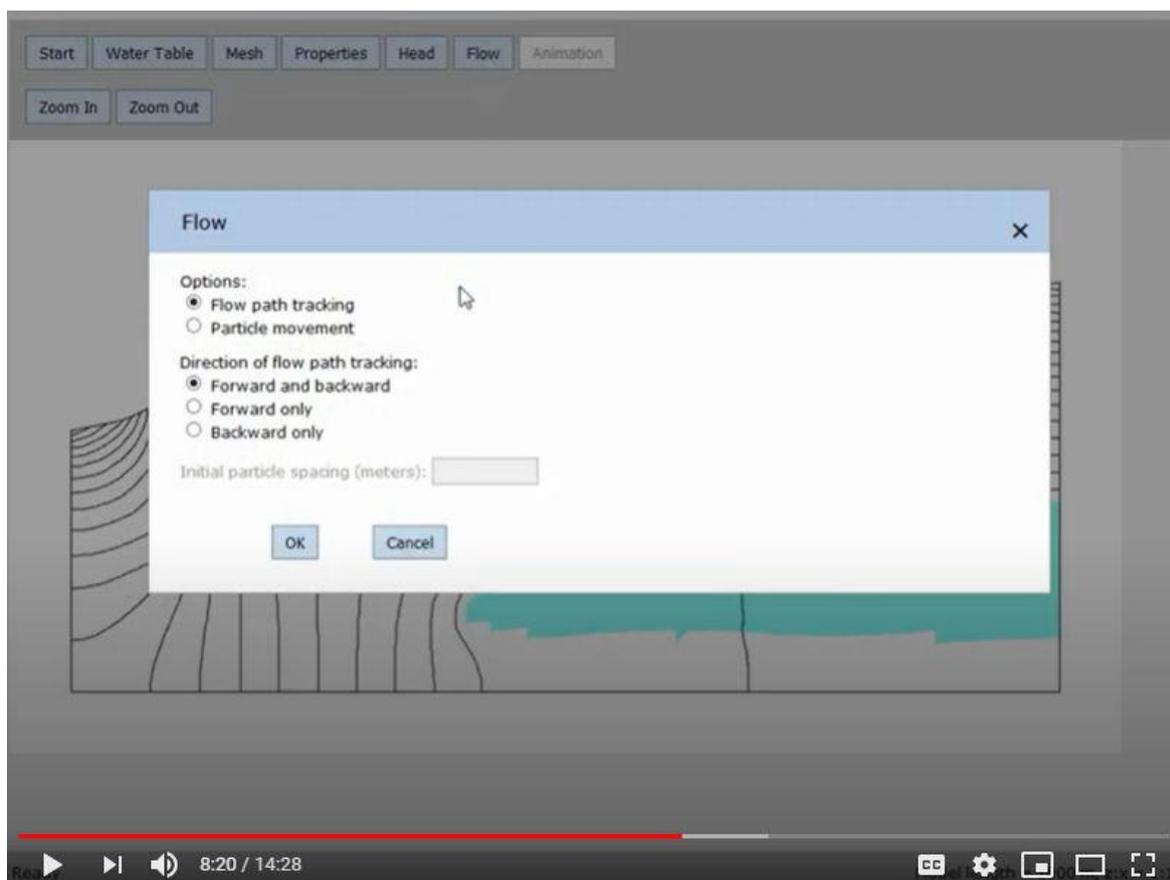


Figura 19 - [Click qui per un video dimostrativo sull'utilizzo di TopoDrive](#) .

Il programma TopoDrive è stato preparato da Hsieh (2001) ed aggiornato sempre da Hsieh (2020) per funzionare negli attuali web browsers. Una volta appreso il funzionamento di TopoDrive, l'utilizzo migliore è quello di confrontare la propria rappresentazione del sistema idrico sotterraneo. Per ottenere questo, costruire un sistema come indicato al Box 6, e prima di selezionare il tasto "Carico Idraulico" che inizierà a disegnare le equipotenziali, cercate di raffigurarle mentalmente o con uno schizzo e solo dopo cliccare il tasto e controllare la soluzione. Se la distribuzione dei carichi è diversa da quella immaginata, cercate di capire il perché al fine di migliorare i vostri ragionamenti. Allo stesso modo prima di cliccare su di un punto per tracciare la linea di flusso, cercate di visualizzarne il percorso e quindi selezionare il punto e controllare la soluzione. Anche in questo case se la linea di flusso è molto diversa da quella immaginata rivalutate i vostri ragionamenti. In sintesi utilizzate il programma non tanto per ottenere una soluzione quanto per migliorare la vostra comprensione dei sistemi di flusso sotterranei.

2.10 Sommario

Un reticolo di flusso consiste in una serie di linee equipotenziali, che illustrano la distribuzione del carico idraulico in un campo di moto ed una serie di linee di flusso, che mostrano i percorsi delle particelle fluide attraverso il sistema. Per la costruzione di un reticolo di flusso il sistema deve essere in condizioni di regime permanente e

bidimensionale o in sezione verticale od in pianta (in assenza di ricarica diffusa). Un reticolo di flusso può essere costruito graficamente con carta e matita con i criteri già illustrati o può essere generato numericamente con un computer. In entrambi i casi la serie di equipotenziali e linee di flusso deve soddisfare l'equazione del flusso idrico sotterraneo.

La costruzione grafica dei reticoli di flusso è limitata a sistemi in condizioni di omogeneità ed isotropia della conducibilità idraulica. In alcuni casi l'anisotropia può essere trattata con una trasformazione geometrica del sistema in uno isotropo equivalente. La costruzione grafica richiede che le equipotenziali e le linee di flusso si intersechino ad angolo retto e che si vengano a formare, dalle intersezioni, maglie quadrangolari con lati curvilinei per mantenere un rapporto lunghezza-larghezza costante. Si deve poter inoltre applicare l'Equazione 2 per calcolare il flusso attraverso il campo di moto. Quando queste ipotesi sono soddisfatte, le equipotenziali hanno incrementi uniformi (equidistanza) da una linea alla successiva e tutti i tubi di flusso trasportano gli stessi volumi idrici. L'unica eccezione è quella frazione di tubo di flusso situata vicino al limite del campo di moto. Se conosciamo la conducibilità idraulica, possiamo ricavare la portata di flusso complessiva per tutto il sistema.

Quando il flusso sotterraneo è simulato tramite un modello numerico, lo stesso è utilizzato più per mostrare le linee equipotenziali e di flusso, dato che le portate sono già state calcolate dal software. In questo modo vi è maggiore flessibilità nel disegnare il campo di moto. Per esempio le equipotenziali possono avere equidistanze variabili ed i tubi di flusso diversi valori di portata. Ad ogni modo, equipotenziali e linee di flusso soddisfano l'equazione generale del flusso idrico sotterraneo ed insieme costituiscono un reticolo di flusso.

I reticoli di flusso si possono utilizzare per comprendere alcuni aspetti fondamentali degli acquiferi. Per esempio se un tubo di flusso si restringe, il principio di conservazione della massa richiede che la velocità aumenti. Inoltre, secondo la legge di Darcy una portata specifica elevata richiede un aumento di gradiente a parità di conducibilità idraulica. Pertanto il restringimento di un tubo di flusso, indicato da linee di flusso convergenti, in un mezzo omogeneo è evidenziato da linee equipotenziali che si avvicinano.

Il reticolo di flusso in un mezzo omogeneo viene distorto dalla presenza di aree a diversa conducibilità idraulica. Se la zona riduce la conducibilità, il tubo di flusso si allarga all'ingresso e si restringe all'uscita e le equipotenziali si avvicinano all'interno di questa zona. Quando la zona aumenta la conducibilità si verifica il contrario ed il tubo di flusso si restringe all'ingresso e si allarga all'uscita e le equipotenziali sono più distanziate all'interno di questa zona.

Nei mezzi anisotropi (ma omogenei) linee di flusso ed equipotenziali non si intersecano ad angolo retto, come in quelli isotropi, ma la trasformazione della geometria permette la costruzione di un reticolo di flusso che poi può essere rimodellato nella sua geometria originale per mostrare il percorso delle particelle fluide.

2.10.1 Nota sui Sistemi di Flusso Idrico Sotterraneo in Condizioni di Non Equilibrio

In regime di flusso transitorio, non si può disegnare un classico reticolo di flusso come spiegato per un sistema in regime di equilibrio. Sebbene le equipotenziali si possono disegnare per un sistema di flusso in un punto ed un certo istante, la sua continua modifica nel tempo rende impossibile disegnare tubi di flusso che mantengano una portata costante. Di conseguenza, per visualizzare il flusso in regime di non equilibrio le equipotenziali si disegnano per ogni istante durante l'evoluzione del fenomeno, così come i vettori velocità corrispondenti, che indicano direzione e grandezza del flusso nei vari punti del sistema. Questa procedura si può paragonare ad un'istantanea della situazione in quel particolare momento.

3 Esercizi

Esercizio 1

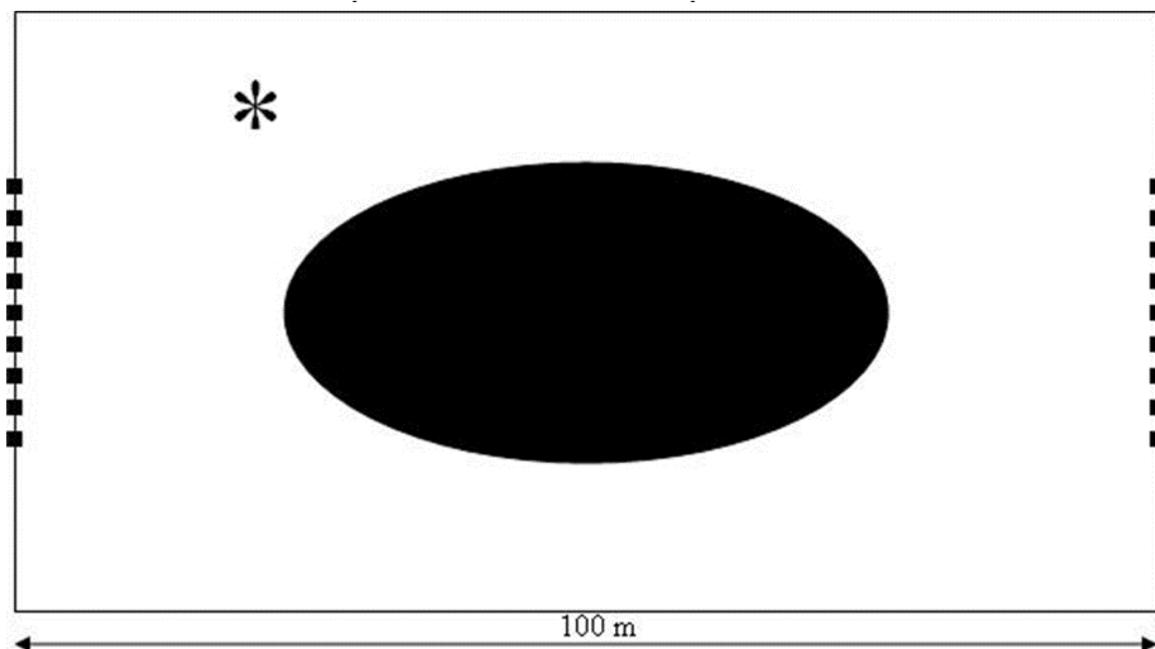
Un filtro in sabbia ha la base a 0 metri ed è alto 10 m. Qui sotto è riportato uno schizzo in pianta ed in scala. Al centro del filtro è situato un pilastro impermeabile. La geometria è uguale per tutta l'altezza dello schema. I serbatoi a sinistra ed a destra sono separati dalla sabbia, da una parete filtrante che interessa solo una porzione a contatto con il serbatoio. Il carico idraulico del serbatoio a sinistra è 20 m mentre a destra è 12 m. La conducibilità idraulica della sabbia è: $K=1 \times 10^{-3}$ m/s.

Disegnare un reticolo di flusso con le quote piezometriche.

Calcolare la portata attraverso il sistema utilizzando come unità metri cubi e secondi.

Quale è il carico idraulico in metri al punto indicato con l'asterisco * sulla sommità del serbatoio ?

Quale è il carico di pressione in metri in quel punto ?

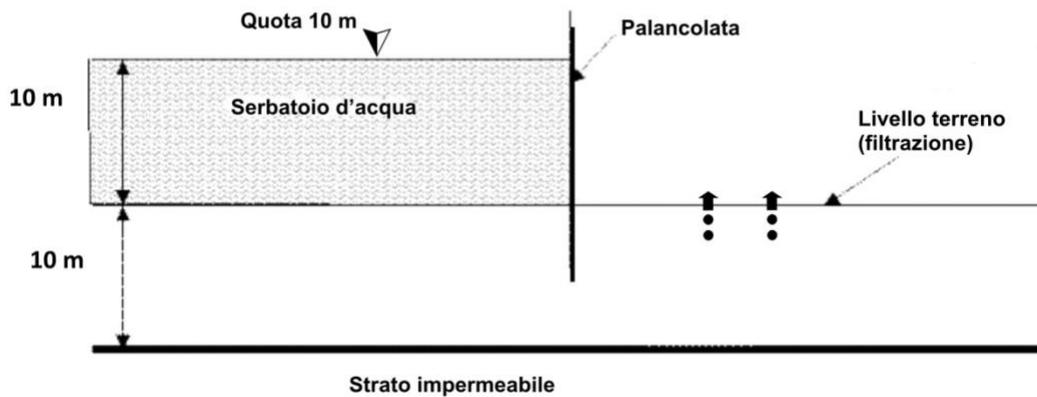


[Click qui per la soluzione dell'Esercizio 1](#) ↴

Esercizio 2

Una palancolata impermeabile è spinta 5 m sotto il terreno e si estende per 22 m in direzione normale al foglio. La palancolata sostiene un serbatoio con altezza d'acqua di 10 m. Supponiamo che il fondo del serbatoio sia costituito da materiale con conducibilità idraulica 2 m/d e che l'acqua filtri verso il terreno a destra della palancolata.

Quale è la portata al di sotto della palancolata ?



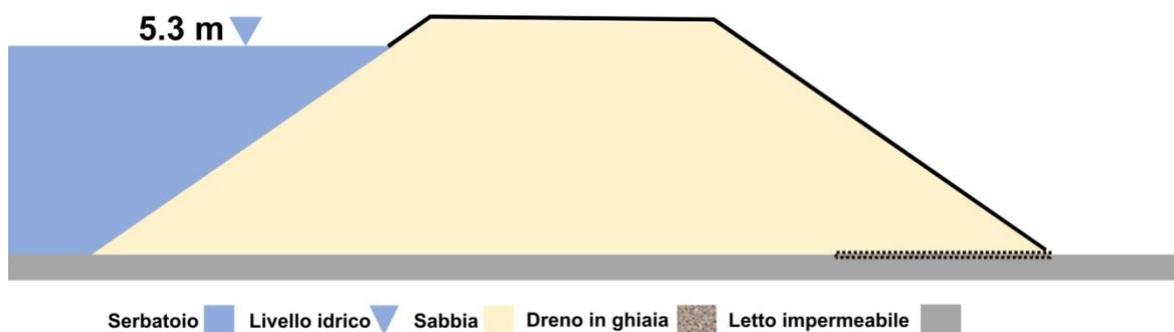
[Click qui per la soluzione dell'Esercizio 2](#) ↴

Esercizio 3

Una diga in terra è rappresentata nella figura in basso. Il materiale utilizzato per bloccare il bacino ha una conducibilità idraulica di 0.2 m/d ed il fondo è impermeabile. La diga si estende per 28 m in direzione perpendicolare alla figura, ed è impermeabilizzata in superficie per impedire infiltrazioni. Il serbatoio a monte ha una quota di 5.3 m. Un dreno ghiaioso è innestato ai piedi dello sbarramento, tra questo ed il letto impermeabile a destra.

Disegnare il reticolo di flusso con le quote delle isopotenziali.

Calcolare la portata di flusso in unità metri cubi al secondo.



[Click qui per la soluzione dell'Esercizio 3](#) ↴

Esercizio 4

La figura in basso mostra una porzione di un acquifero confinato anisotropo ($K_x=225$ m/d e $K_y = 9$ m/d), potente 100 m. L'area lunga 281 km e larga 144 km, circondata da limiti impermeabili a nord e a sud. Del materiale impermeabile si innesta nell'acquifero, indicato a destra in nero. Il carico idraulico è 1000 m al limite ovest, 900 m a quello nordest e 800 m al limite di sudest.

Disegnare il reticolo di flusso con le quote delle isopotenziali.

Calcolare la portata di flusso in unità metri cubi al secondo.



[Click qui per la soluzione dell'Esercizio 4](#) ↴

4 Bibliografia

Hsieh, P.A., 2001, TopoDrive e ParticleFlow – Due Programmi Numerici per la Simulazione e Visualizzazione del Flusso Idrico Sotterraneo e Trasporto delle Particelle Fluide in Due Dimensioni. U.S. Geological Survey Open File Report 01-286, 30 pagine.

Hsieh, P.A., 2020, TopoDrive e ParticleFlow versione online, website <https://tdpfonline.net>.

Woessner, W. e E. Poeter, 2020, Proprietà Idrogeologiche dei Terreni e Principi del Flusso Idrico Sotterraneo. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, <https://gw-project.org/books/hydrogeologic-properties-of-earth-materials-and-principles-of-groundwater-flow/>.

5 Approfondimenti (Box)

Box 1 - Ripasso del Carico Idraulico

L'energia meccanica è il motore principale del flusso idrico sotterraneo. In altre parole l'acqua nel sottosuolo si sposta da punti ad alta energia meccanica verso punti a energia minore. In alcune zone il flusso può essere provocato da variazioni termiche o chimiche. In pratica ed in molti casi queste ultime situazioni non sono importanti quando dobbiamo disegnare un reticolo di flusso per un sistema idrico sotterraneo e non profondo. L'energia è il prodotto della forza per la distanza. Per effettuare valutazioni idrogeologiche è comunque più conveniente esprimere l'energia sotto forma di carico idraulico, definito come energia meccanica su peso dell'acqua. Il carico idraulico (h) è composto da due parti: l'energia potenziale legata alla quota dell'acqua nel campo gravitazionale e quella del fluido dovuta alla distribuzione delle pressioni. Per ottenere la stessa unità della quota (cioè una lunghezza), sostituiamo la pressione con il carico di pressione, pressione divisa per il prodotto della densità dell'acqua per l'accelerazione di gravità. Il carico di pressione diventa l'altezza della colonna d'acqua che produce una certa pressione. Per esempio una colonna d'acqua alta un metro esercita una pressione di 9800 pascal o 1.4 libbre su pollice quadro. Pertanto un carico di pressione di 1 metro equivale a 9800 pascal, pari a 0.09 atm (od anche 10 m d'acqua dolce corrispondono a circa una atmosfera o 1 kg/cm², Nd.T.)

Il carico idraulico in un acquifero è dato dalla somma del carico di quota/altezza e di pressione, come spiegato nell'Equazione del Box 1-1.

$$h = z + \frac{p}{\rho g} = z + \psi \quad (\text{Box 1-1})$$

dove:

h = carico idraulico in un punto del sistema (L)

z = quota del punto (L)

p = pressione nel punto (F/L², Forza/Area)

ψ = $p/\rho g$ è il carico di pressione (L)

ρ = densità dell'acqua (M/L³)

g = accelerazione di gravità (L/T²)

Le componenti del carico idraulico in un serbatoio idrico sono illustrate nella Figura del Box 1-1. Per le misure di quota è scelto un piano orizzontale di riferimento. In genere tale piano è il livello mare. In queste figure come piano di riferimento è scelta la superficie orizzontale del substrato roccioso. Per un tubo vuoto aperto alle due estremità, come indicato dalle due linee parallele nella Figura del Box 1-1, il carico idraulico si misura alla base del tubo. La quota del punto di misura, z , è quella della base del tubo sopra il piano di

riferimento; il carico di pressione, ψ , è l'altezza della colonna d'acqua nel tubo, sopra il punto di misura; ed il carico idraulico, h , al punto di misura è la somma del carico di altezza o di quota e del carico di pressione. La somma dei due carichi, altezza e pressione, eguaglia la quota dell'acqua nel tubo. La Figura nel Box 1-1 mostra z , ψ , e h per tubi superficiali e profondi in un serbatoio d'acqua in quiete. Un serbatoio è considerato in condizioni statiche nel senso che l'acqua è ferma. In questo esempio pertanto il carico idraulico è simile in tutti i punti del serbatoio. Per capirlo è sufficiente inserire un tubicino in una vasca da bagno piena d'acqua e notare che il livello nel tubo è sempre lo stesso in qualunque punto lo mettiamo.

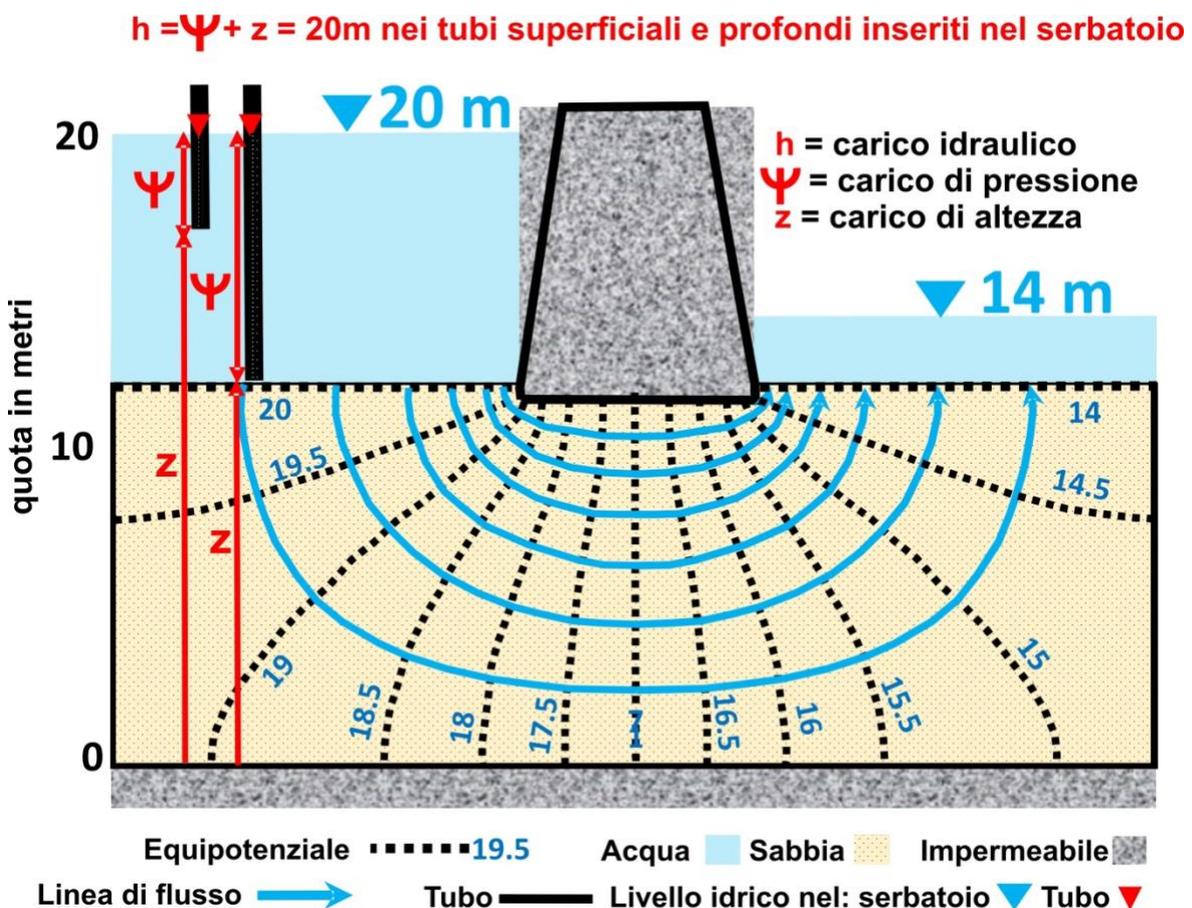


Figura Box 1-1 – Schema che illustra le componenti del carico idraulico in un serbatoio d'acqua, a monte di uno sbarramento impermeabile. Il carico idraulico è simile in tutti i punti del serbatoio che contiene un volume d'acqua in quiete.

In un sistema acquifero al di sotto di una diga con serbatoio a quote diverse, l'acqua sotterranea è in movimento e scorre dal serbatoio a monte a quello a valle attraverso il materiale poroso al di sotto della diga. La Figura nel Box 1-2 mostra z , ψ , e h per dei tubi (pozzetti di monitoraggio) in un sistema acquifero. Il livello d'acqua in ciascun pozzetto corrisponde al carico idraulico del punto di misura (la base del tubo). Dato che l'acqua sotterranea scorre da punti a carico più alto verso quelli a carico più basso, il flusso va da sinistra a destra. Il carico si "riduce" a mano a mano che l'acqua scorre nel mezzo poroso poiché l'energia meccanica si trasforma in energia termica, anche se la variazione di

temperatura è troppo debole da misurare. Quando l'acqua scorre dal serbatoio superiore al primo pozzetto a sinistra, viene perso 1 m di carico idraulico. Ulteriori 4 m di carico sono persi nel percorso dell'acqua fino al piezometro a destra.

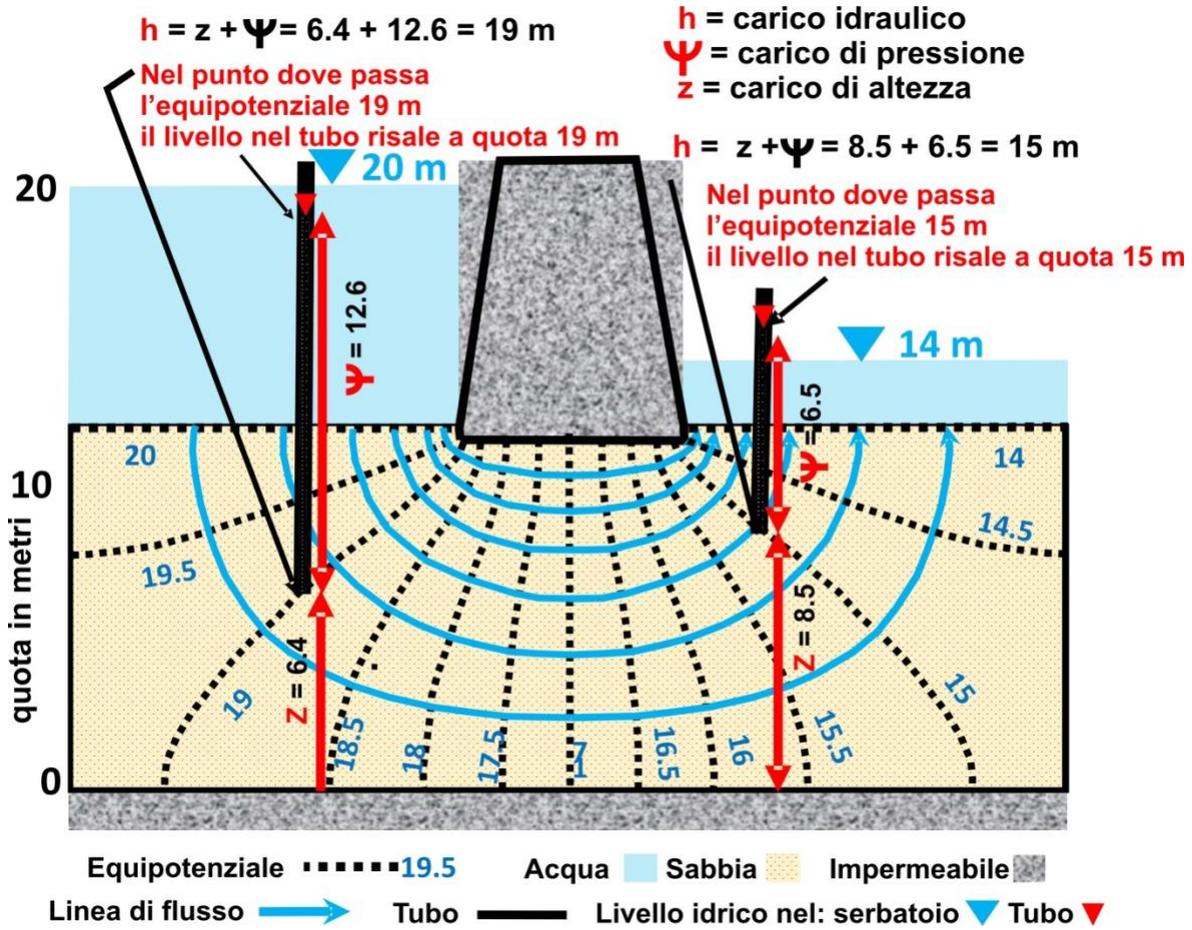


Figura Box 1-2 – Schema che illustra le componenti del carico idraulico in un sistema idrico sotterraneo che scorre sotto un diga impermeabile.

[Ritorno al link del Box 1](#) ↑

Box 2 - Ripasso della Legge di Darcy

La Legge di Darcy (Equazione nel Box 2-1) stabilisce che la portata dell'acquifero in un materiale poroso è 1) direttamente proporzionale alla differenza di carico idraulico tra due punti, 2) indirettamente proporzionale alla lunghezza di percorso tra questi, e 3) direttamente proporzionale all'area attraverso cui avviene il flusso. La proporzionalità è trasformata in un'equazione esatta inserendo una costante di proporzionalità, in questo caso, la conducibilità idraulica. La Legge di Darcy è illustrata nella Figura del Box 2-1 e stabilisce che il carico idraulico diminuisce linearmente in un mezzo omogeneo con area costante, come indicato nella Figura del Box 2-2.

$$Q = \text{conducibilità idraulica} \frac{\text{differenza di carico}}{\text{distanza tra i punti}} \text{ area} = KiA \quad (\text{Box 2-1})$$

con:

$$Q = \text{portata (L}^3/\text{T)}$$

$$K = \text{Conducibilità idraulica del mezzo poroso (L/T)}$$

i = Gradiente idraulico nella direzione di flusso, $h_2 - h_1$ nella Figura del Box 2-1 diviso per la distanza tra i due punti di misura del carico (adimensionale L/L)

$$A = \text{area perpendicolare alla direzione di flusso (L}^2\text{)}$$

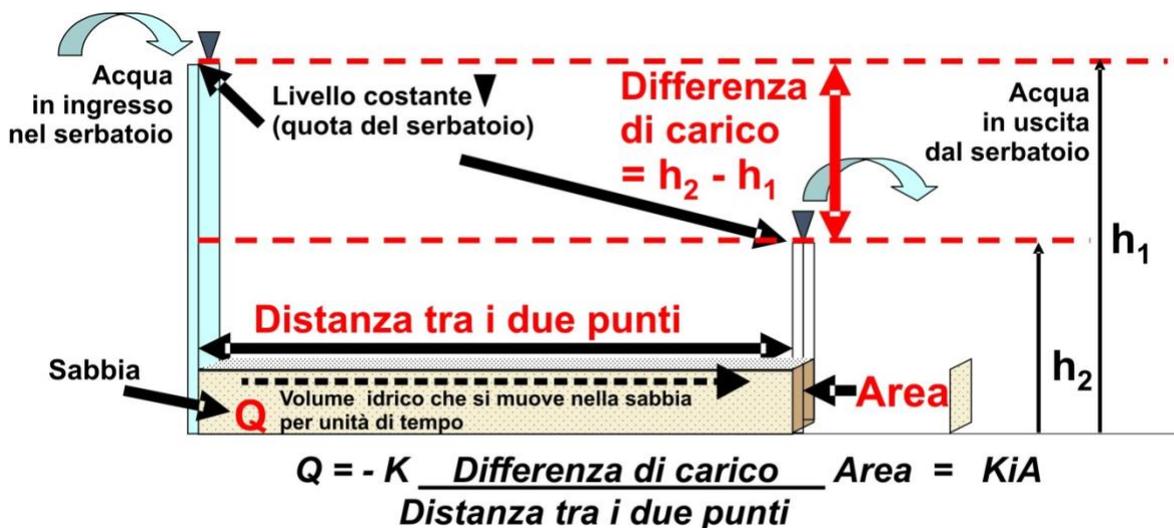


Figura Box 2-1 – Illustrazione dei parametri nella Legge di Darcy

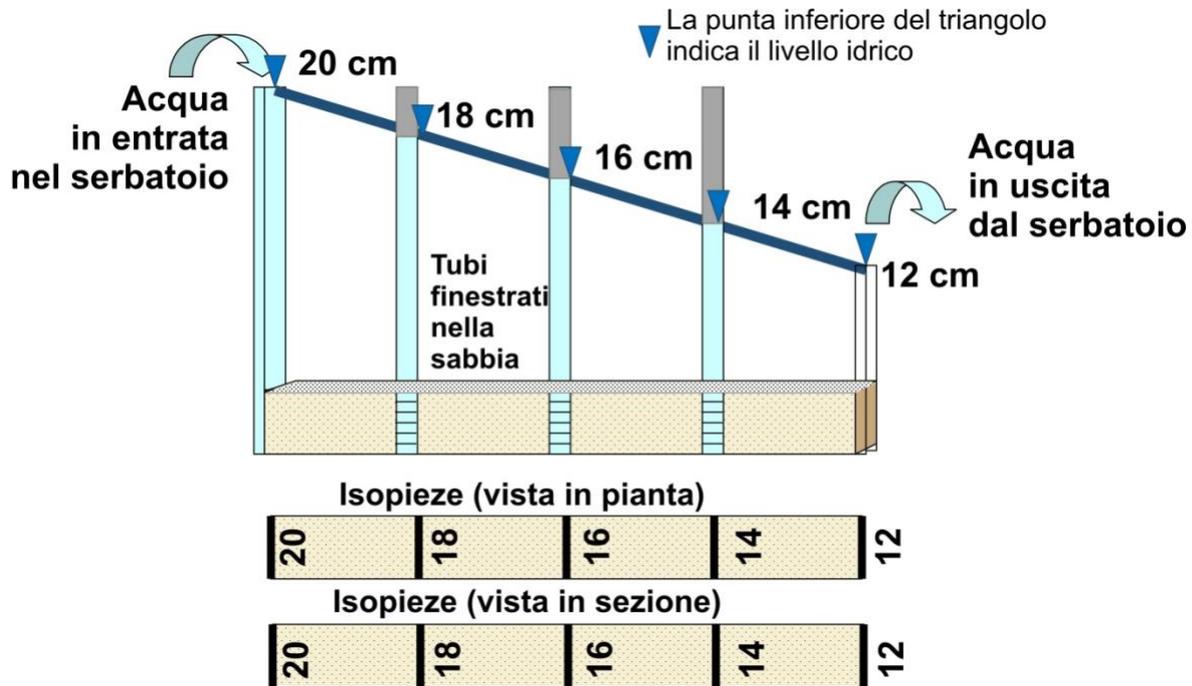


Figura Box 2-2 – Secondo la Legge di Darcy, il carico idraulico diminuisce linearmente in un mezzo omogeneo e sezione di flusso costante.

La portata specifica è quella divisa per l'area come mostrato nell'Equazione del Box 2-2. E, dato che le dimensioni della portata specifica sono lunghezza su tempo (L/T), come quelle per la velocità, la portata specifica viene anche chiamata velocità Darcyana. Questo termine può creare confusione perché non si riferisce alla velocità effettiva dell'acqua sotterranea (Figura nel Box 2-3a). In questo libro si preferisce quindi usare la definizione di portata specifica e non di velocità Darcyana.

$$q = \frac{Q}{A} \quad \text{od anche } q = Ki \quad (\text{Box 2-2})$$

dove:

$$q = \text{portata specifica (L/T)}$$

A scala microscopica, gli effettivi spostamenti e le velocità delle particelle idriche tra i vuoti dei granuli sono molto complessi ed impossibile da descrivere in modo preciso. La Legge di Darcy e l'idrologia sotterranea trattano pertanto, il flusso a scala macroscopica ed ignorano i complessi percorsi delle linee di flusso a scala microscopica. Sempre a scala macroscopica (quella alla quale si applica la Legge di Darcy) possiamo definire una "velocità media lineare dell'acqua sotterranea" pari alla portata specifica divisa per la porosità efficace, come indicato nell'Equazione del Box 2-3. La porosità efficace corrisponde al volume dei vuoti che contiene acqua in grado di fluire divisa per il volume totale del mezzo poroso, come mostrato nella Figura del Box 2-3c. Il termine "lineare" si riferisce alla semplificazione che la particella fluida viaggia secondo un percorso diretto (non tortuoso tra i grani) nella direzione di massimo gradiente. Il termine "media", invece non si riferisce alla medie delle velocità a scala microscopica. Sarebbe più corretto considerare il termine "media" col significato di "macroscopico." Per evitare di scrivere la definizione completa

“velocità media lineare dell’acqua sotterranea” nel resto del libro useremo quello più breve di “velocità dell’acqua sotterranea”.

$$\bar{v} = \frac{q}{n_e} = \frac{Q}{An_e} \quad (\text{Box 2-3})$$

dove:

\bar{v} = velocità media lineare dell’acqua sotterranea (L/T)

n_e = porosità effettiva, data dal rapporto tra il volume dei pori interconnessi ed il volume totale del campione (adimensionale)

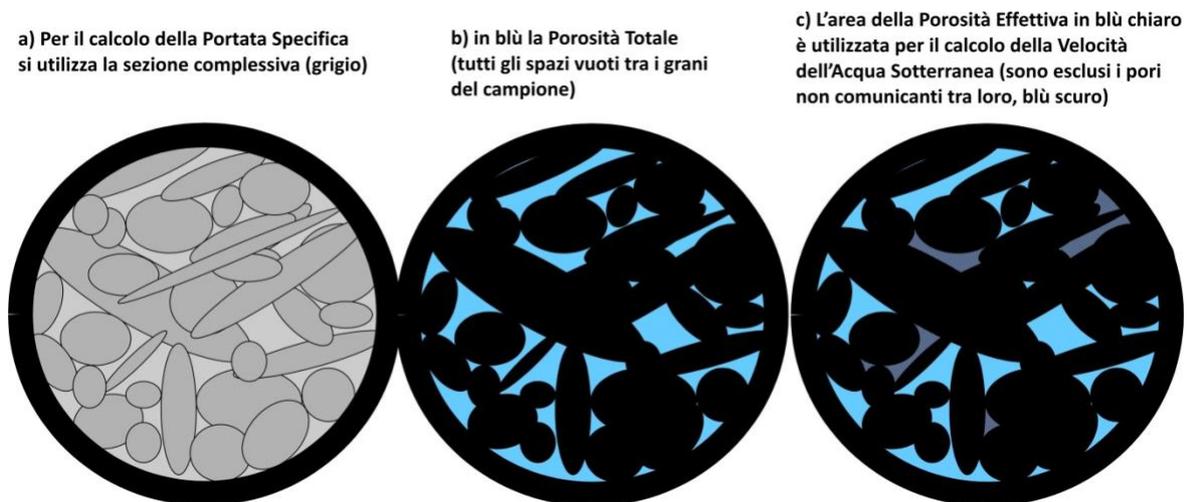


Figura Box 2-3 – Aree utilizzate per calcolare la portata specifica e la velocità media lineare: a) la portata specifica è definita come una portata divisa per la sezione totale di passaggio (cerchio in grigio); b) la porosità comprende tutti i pori segnati in blu; c) la velocità lineare media è maggiore della portata specifica perché si riferisce alla porzione di spazio realmente libera per il flusso (area in blu più chiaro).

Quando si deve considerare il tempo di transito delle acque sotterranee, utilizziamo il concetto di “unità d’acqua” per rappresentare piccoli volumi elementari d’acqua che fluiscono compatti senza subire ulteriori suddivisioni. A volte si usa, in analogia, anche il termine “particelle idriche”. Quando la velocità è uniforme lungo una linea di flusso, il tempo impiegato dalla particella per spostarsi da un punto ad un altro lungo la linea di flusso viene calcolato dividendo la distanza del percorso per la velocità dell’acqua sotterranea. Questo è illustrato nell’Equazione del Box 2-4. In un campo di moto con velocità costante, il tempo di transito da A a B è la distanza divisa per la velocità, in analogia con quello impiegato da un’automobile. In un campo di moto con velocità di spostamento dell’acqua sotterranea non uniforme, il calcolo del tempo di transito lungo una linea di flusso dal punto A al punto B richiede la suddivisione del percorso in tratti più brevi e la sua valutazione per ogni segmento. Il tempo totale di transito da A a B è quindi la somma di tutti i tempi parziali per ogni segmento. Nelle applicazioni pratiche questo calcolo viene effettuato dal computer che riproduce le particelle fluide attraverso la simulazione di un sistema di flusso dell’acquifero.

$$t_t = \frac{\text{distanza}}{\bar{v}} \quad (\text{Box 2-4})$$

dove:

t_t = tempo di transito lungo la linea di flusso tra due punti (T)

distanza = distanza lungo la linea di flusso (L)

\bar{v} = velocità dell'acqua sotterranea (L/T) considerate uniforme lungo la
linea di flusso

[Ritorno al link del Box 2](#) ↑

Box 3 - Derivazione: Formula per la Portata attraverso un Reticolo di Flusso

La portata è il volume idrico che fluisce in un sistema nell'unità di tempo. Ha le dimensioni di volume, o lunghezza al cubo, su tempo (per esempio litri al minuto, o metri cubi al secondo).

Per ricavare la formula della portata attraverso un reticolo di flusso si utilizza un contenitore rettangolare riempito di sabbia omogenea con conducibilità idraulica di 0.4 cm/s. Lo schema del serbatoio rettangolare è nella Figura del Box 3-1. La sabbia riempie tutto il contenitore, tutte le pareti sono impermeabili ad esclusione di dove l'acqua entra ed esce, lungo le linee tratteggiate. Le linee rappresentano i filtri che trattengono la sabbia. La scatola è alta 33 cm, lunga 66 cm e larga 50 cm (si estende per 50 cm in direzione normale al foglio). Tutte le sezioni attraverso il contenitore da sinistra a destra sono uguali, ne viene mostrata pertanto solo una nella Figura del Box 3-1. Il livello d'acqua a sinistra è fisso a 50 cm ed a destra a 44 cm. Il flusso va da sinistra a destra.

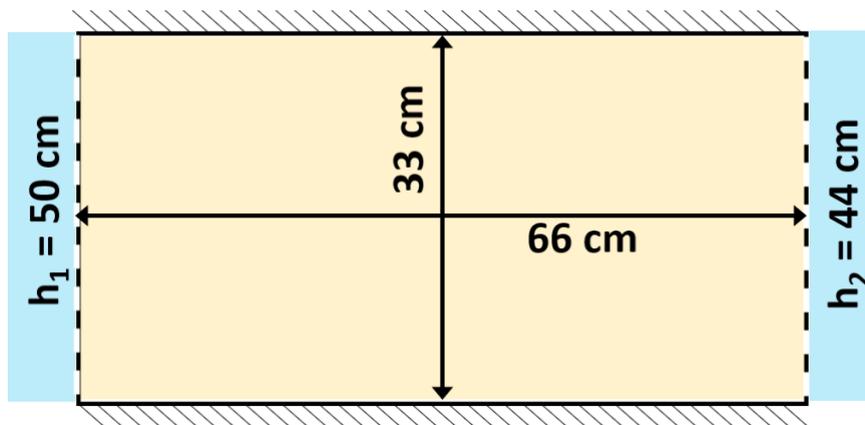


Figura Box 3-1 – Una scatola rettangolare riempita di sabbia con limiti a carico costante ad entrambi i lati.

Per questo caso particolare non abbiamo bisogno di costruire un reticolo di flusso e poi applicare una formula per calcolare la portata. Data la semplice geometria la portata si può ricavare sostituendo direttamente i valori nella Legge di Darcy (Equazione del Box 3-1), come segue:

$$Q = -KiA \quad (\text{Box 3-4})$$

dove:

$$Q = \text{portata (L}^3/\text{T)}$$

$$i = \text{gradiente idraulico (adimensionale)}$$

$$A = \text{area normale alla direzione di flusso (L}^2\text{)}$$

$$Q = -\left(0.4 \frac{\text{cm}}{\text{s}}\right) \left(\frac{44 \text{ cm} - 50 \text{ cm}}{66 \text{ cm}}\right) (33 \text{ cm}) (50 \text{ cm}) = 60 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

$$Q = \left(60 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}\right) \left(60 \frac{\text{s}}{\text{min}}\right) \left(\frac{\text{litri}}{1000 \text{ cm}^3}\right) = 3.6 \frac{\text{litri}}{\text{min}}$$

Sebbene sia facile applicare la Legge di Darcy per calcolare la portata con geometrie semplici, lo stesso non lo è con geometrie più complesse. In quest'ultimo caso è necessario 1) costruire un reticolo grafico di flusso e quindi applicare la formula per calcolare la portata, oppure 2) applicare un codice di calcolo numerico per calcolare la portata. Il Box 3-2 si riferisce al primo metodo con la formula corrispondente. Il contenitore è utilizzato come esempio ma la formula ottenuta è valida anche per casi complessi.

Per ricavare la formula applicata al flusso nel contenitore, costruiamo un reticolo di flusso come nella Figura del Box 3-2. Per questa geometria semplice, le equipotenziali sono diritte e verticali mentre le linee di flusso diritte ed orizzontali. I due gruppi di linee si intersecano ad angolo retto e formano dei quadrati. Ogni tubo di flusso ha la stessa portata. La Legge di Darcy permette di ricavare la portata in ogni tubo di flusso calcolando il flusso attraverso il quadrato di larghezza y (per esempio quello evidenziato in nero nella Figura del Box 3-2).

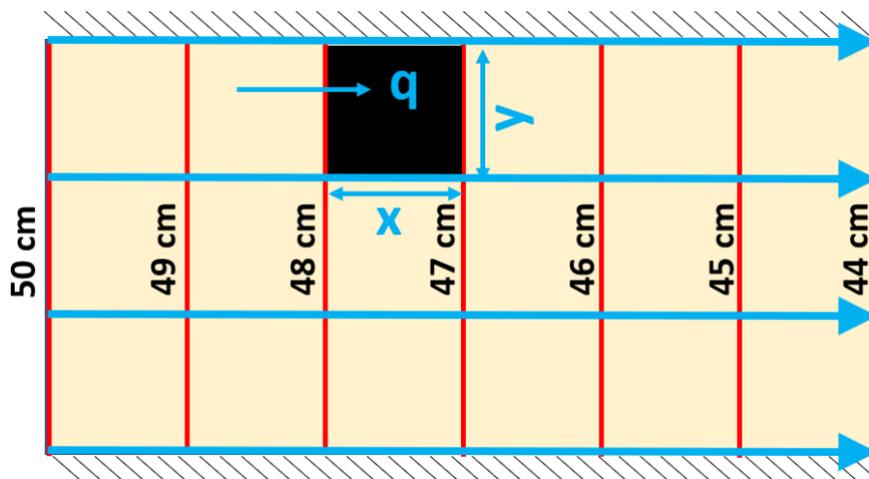


Figura Box 3-2 – Schema per derivare l'equazione della portata di un reticolo di flusso utilizzando la larghezza unitaria di una maglia del reticolo stesso.

La differenza di carico idraulico tra due equipotenziali del reticolo di flusso (Equazione nel Box 3-2) si ricava come quoziente della differenza di carico complessiva, del reticolo di flusso, H ($H = 6 \text{ cm}$ in questo caso), ed il numero di intervalli, n_d ($n_d = 6$ in questo caso, come nella Figure del Box 3-3).

$$h_{diff} = \text{equidistanza} = \frac{H}{n_d} \quad (\text{Box 3-5})$$

dove:

equidistanza = differenza di carico tra due equipotenziali adiacenti (L)

H = differenza di carico totale nel campo di moto (L)

n_d = numero di salti di potenziali nel campo di moto (adimensionale)

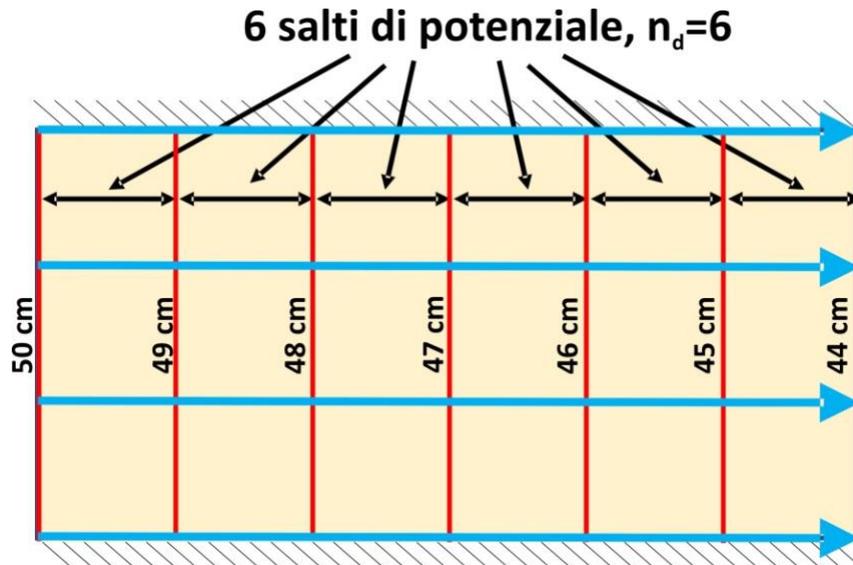


Figura Box 3-3 - Numero di salti di potenziale per l'esempio del reticolo di flusso.

Per questo reticolo, $h_{diff} = ((6 \text{ cm}) / (6 \text{ salti di potenziale}))$, o 1 cm come indicato dalle etichette sulle equipotenziali nella Figura del Box 3-2 e del Box 3-3.

La portata attraverso il tubo di flusso per larghezza unitaria normale al disegno si ricava con la Legge di Darcy e pari al prodotto della conducibilità idraulica (K), il gradiente (h_{diff}/x) e la larghezza del tubo di flusso in pianta (Equazione nel Box 3-6).

$$Q'_{tubo} = K \frac{h_{diff}}{x} y \quad (\text{Box 3-6})$$

dove:

Q'_{tubo} = Portata attraverso un tubo di flusso per unità di area normale al disegno (L^2/T)

x = distanza tra le linee equipotenziali (L)

y = larghezza del tubo di flusso in pianta (L)

Per una maglia quadra del reticolo (come quella evidenziata in nero nella Figura del Box 3-2), $x=y$, e l'equazione si può semplificare considerando il loro rapporto = 1 e ottenendo la formula attraverso un tubo di flusso per unità di larghezza come mostrato nell'Equazione del Box 3-4.

$$Q'_{tubo} = K h_{diff} = K \frac{H}{n_d} \quad (\text{Box 3-7})$$

Per reticoli più complessi le equipotenziali e le linee di flusso si intersecano per formare quadrilateri con lati curvi e non perfettamente uguali. In questo caso il rapporto tra x e y si può considerare proporzionale. Per un quadrato curvilineo è 1 ed è valida la semplificazione dall'Equazione nel Box 3-6 a quella nel Box 3-4.

Dato che Q'_{tubo} non varia nei diversi tubi di flusso la portata complessiva per larghezza unitaria normale al disegno si ottiene moltiplicando Q'_{tubo} per il numero di tubi di flusso come mostrato nell'Equazione del Box 3-5.

$$Q' = Q'_{tubo} n_f = K \frac{H}{n_d} n_f \tag{Box 3-8}$$

dove:

n_f = numero di tubi di flusso nel reticolo

Q' = portata complessiva per unità di larghezza normale al disegno (L^2/T)

Il campo di moto ha 6 salti di potenziale ($n_d = 6$) e 3 tubi di flusso ($n_f = 3$) indicati nella Figura del Box 3-4.

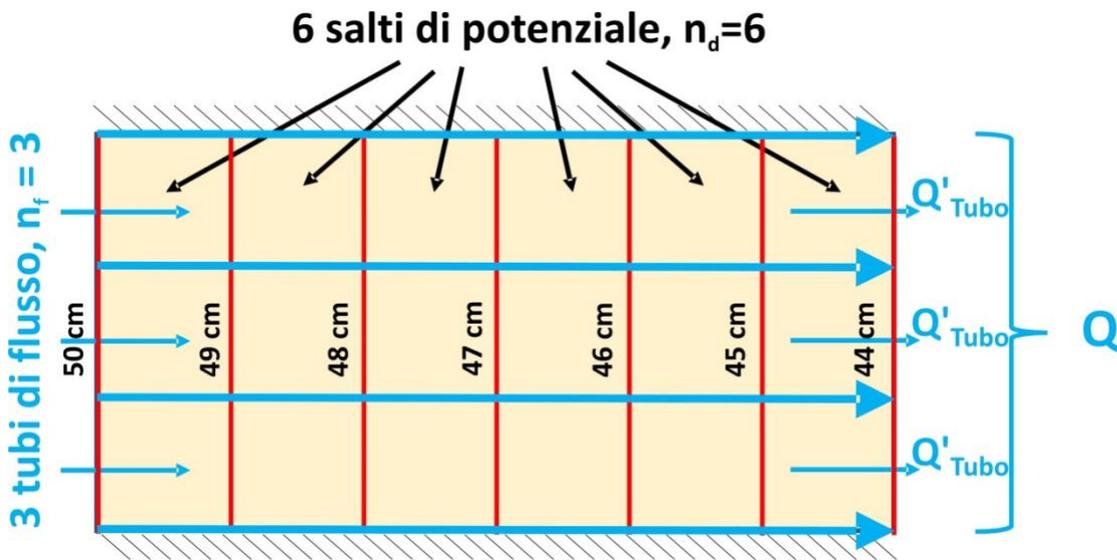


Figura Box 3-4 – Numero di tubi di flusso ed equipotenziali nell'esempio.

Il parametro Q' ha le dimensioni di una lunghezza al quadrato su tempo, L^2/T , perché rappresenta la portata per un'unità di larghezza nel disegno (Equazione del Box 3-6).

$$Q' = K \frac{H}{n_d} n_f = KH \frac{n_f}{n_d} : \frac{L}{T} \frac{L}{-} : \frac{L^2}{T} \tag{Box 3-9}$$

dove:

– = indica che il parametro è adimensionale

Per calcolare la portata complessiva attraverso il contenitore, Q_{totale} , moltiplichiamo Q' per la larghezza della scatola (normale al disegno), ed abbiamo una lunghezza al cubo su tempo, L^3/T come nell'Equazione del Box 3-7.

$$Q_{totale} = K H \frac{n_f}{n_d} w : \frac{L^3}{T} \tag{Box 3-10}$$

dove:

w = Larghezza del dominio in direzione normale al disegno (L)

La formula si applica anche al calcolo della portata per reticoli di flusso a geometria più complessa. La formula non considera le dimensioni assolute di lunghezza ed altezza del sistema. Essa utilizza solo valori relativi di lunghezza ed altezza della scatola e pertanto il disegno va eseguito in scala correggendo la relativa lunghezza ed altezza. La distanza (profondità) del sistema perpendicolare al disegno deve essere nota per determinare la portata complessiva.

Sostituendo i valori di n_f , n_d , H , K e w per la scatola rettangolare nell'equazione per il calcolo della portata attraverso un reticolo di flusso, il risultato eguaglia quello ottenuto applicando la Legge di Darcy all'inizio di questo esempio.

$$Q_{totale} = \left(0.4 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}\right) (6 \text{ cm}) \left(\frac{3}{6}\right) (50 \text{ cm}) = 60 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

[Ritornare al collegamento al Box 3](#) ↑

Box 4 - Disegno del Reticolo di Flusso per un Acquifero Libero con Limite la Tavola d'Acqua

Gli acquiferi freatici hanno un limite superiore che corrisponde alla tavola d'acqua e che richiede un approccio particolare quando si tratta di costruire un reticolo di flusso. Questo è dovuto al fatto che la posizione della falda idrica non è nota fino a quando non è ricostruito un reticolo di flusso sufficientemente valido.

Per illustrare il concetto consideriamo il flusso attraverso una diga in terra il cui materiale ha una conducibilità idraulica di 0.2 m/d e poggia su di una base impermeabile (Figura nel Box 4-1). La diga si estende per 55 m in direzione normale al disegno ed è impermeabilizzata alla superficie di modo da evitare infiltrazioni da acque superficiali. L'acqua filtra dal bacino a monte a sinistra verso quello a valle a destra.

Iniziamo a disegnare il reticolo di flusso come descritto alla sezione 2.3 e mostrato nella Figura del Box 4-1. La posizione della tavola d'acqua non è nota fino a quando non si inizia a delineare il sistema di flusso secondo le regole già viste. Lo schema iniziale è quindi incerto ed indicato con una linea tratteggiata con punto di domanda "?".

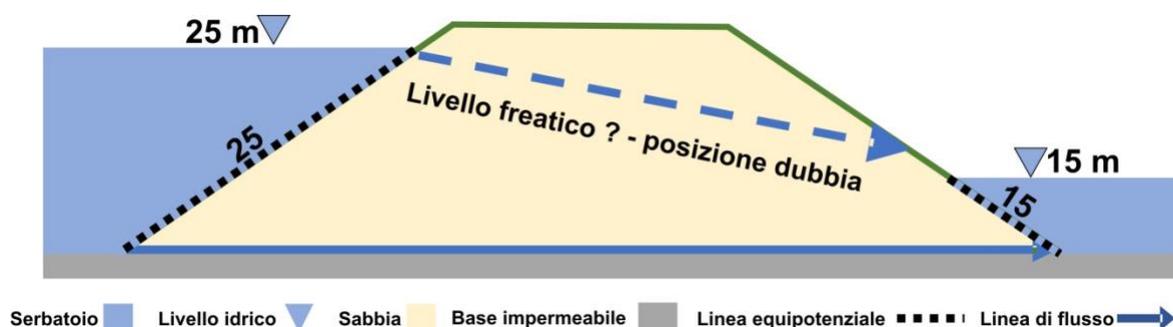


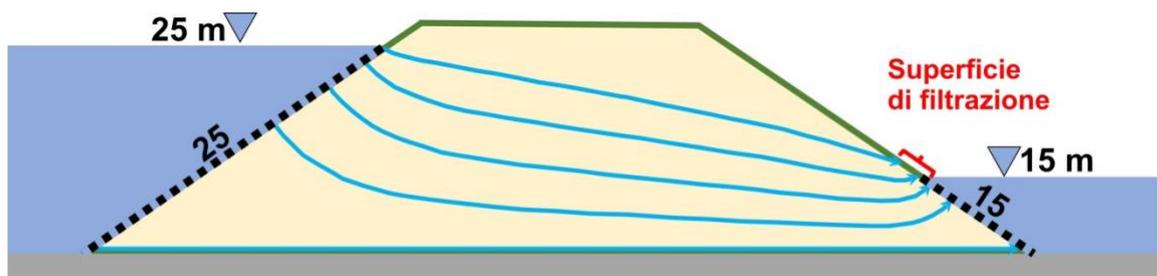
Figura Box 4-1 - Step 1 – Disegnare lo schema in scala, Step 2 – Disegnare le equipotenziali che corrispondono ai limiti, Step 3 – Disegnare le linee di flusso che coincidono ai limiti a flusso zero.

La rappresentazione del campo di moto è un processo iterativo dovuto al fatto che le equipotenziali e le linee di flusso vanno progressivamente modificate fino ad ottenere maglie quadrangolari con lati curvilinei. La difficoltà ulteriore quando si considera un acquifero libero è che la posizione del limite superiore (la tavola d'acqua) e la lunghezza della superficie di filtrazione vanno modificate di continuo in fase di disegno dei quadrilateri.

Il passo seguente è quello di disegnare le linee di flusso lungo dei percorsi dove si ipotizza che scorrerà l'acqua, badando che siano perpendicolari alle equipotenziali sui limiti (Figura del Box 4-2). Dato che non vi è ricarica dal limite superiore impermeabile, la linea di flusso più alta corrisponde alla tavola d'acqua. La linea di flusso deve incontrare l'equipotenziale 25 m (limite a carico costante) con un angolo retto. La parte a valle della superficie freatica interseca la superficie della diga ad una quota maggiore della superficie del serbatoio a valle (formando una superficie di filtrazione come indicato nella Figura del Box 4-2), con una pendenza uguale a quella della superficie della diga. Analogamente al

fatto che la posizione iniziale della tavola d'acqua non è nota fino a quando non è completato il reticolo di flusso, anche la lunghezza della superficie di filtrazione non è definitiva. Il carico idraulico lungo la superficie di filtrazione è uguale alla quota del terreno poiché la pressione relativa è pari a zero. Diversamente dalla superficie freatica, prima di disegnare il reticolo di flusso, noi conosciamo la posizione della superficie di filtrazione, lungo la parete a valle della diga, ma non la sua lunghezza.

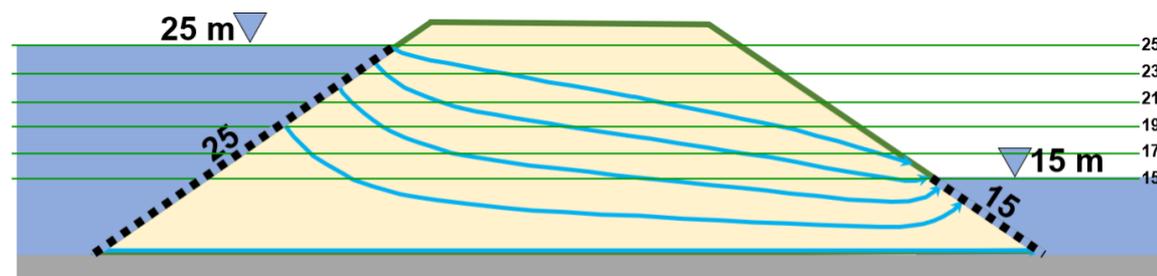
Sebbene per praticità abbiamo disegnato le linee di flusso nella posizione esatta è probabile che il primo tentativo di tracciamento richieda qualche aggiustamento. E' probabile che le linee siano cancellate e ridisegnate prima di ottenere una rappresentazione fedele alle ipotesi di partenza.



Serbatoio ■ Livello idrico ▼ Sabbia ■ Base impermeabile ■ Linea equipotenziale ■■■■■ Linea di flusso →

Figura Box 4-2 - Step 4: Disegnare le linee di flusso dove si prevede che scorra l'acqua sotterranea, facendo attenzione che siano normali alle equipotenziali in corrispondenza dei limiti. E' probabile che i primi tentativi richiedano degli aggiustamenti. Il processo della costruzione del campo di moto è iterativo.

Disegnando le maglie è importante ricordare che il carico idraulico di una linea equipotenziale è uguale alla quota alla quale incontra la falda (o la superficie di filtrazione), il carico è infatti dato dalla somma del carico di pressione (espresso come altezza della colonna d'acqua) e dalla quota. Per indicare la pressione si utilizza di solito quella relativa considerando uguale a zero quella atmosferica. Alla superficie freatica e lungo quella di filtrazione la pressione relativa è zero e quindi il carico idraulico è uguale alla quota. Per questo motivo e come ausilio grafico aggiungiamo delle linee orizzontali di uguale quota prima di disegnare le equipotenziali (Figura del Box 4-3).



reservoir ■ water level ▼ sand ■ impermeable bed ■ equipotential line ■■■■■ flow line →

Figura Box 4-3 – Prima di tracciare le equipotenziali segnare le linee alla stessa quota, dato che il valore dell'equipotenziale è pari alla quota nel punto di intersezione con la tavola d'acqua e la superficie di filtrazione. La linea orizzontale permette quindi di avere un riferimento per la traccia dell'equipotenziale.

Dopo avere segnato le linee di quota orizzontali, iniziare con le equipotenziali ad angolo retto con i limiti a flusso nullo e con le linee di flusso. Assicurarsi che le equipotenziali incontrano la superficie freatica e quella di filtrazione ad una quota pari al carico idraulico dell'equipotenziale. In questo modo si deve ottenere una maglia di elementi quadrangolari (quadrati con lati curvilinei). Come abbiamo descritto in precedenza dovrà essere possibile disegnare un cerchio tangente internamente ai lati di ogni maglia. Se questo di verifica anche non esattamente, allora abbiamo ottenuto dei quadrilateri con lati curvilinei (Figura del Box 4-4).

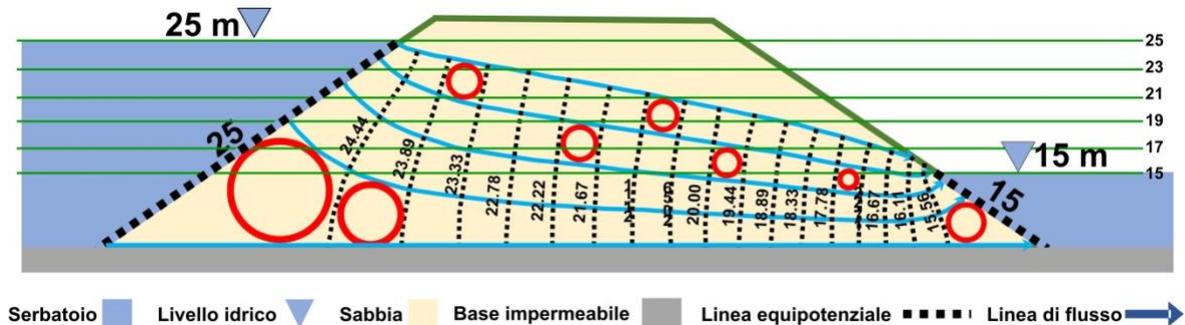


Figura Box 4-4 – Le forme delle maglie sono quadrilateri curvilinei quando è possibile inscrivere un cerchio tangente ai lati anche non esattamente. Una zona del reticolo può contenere tubi di flusso parziali, come quello stretto alla base del disegno. Il reticolo ottenuto ha 18 salti di potenziale e 4 tubi di flusso.

Uno schema approssimato delle linee equipotenziali fornisce una stima del numero di salti di equipotenziale necessari per ottenere dei quadrati con lati curvilinei. Nel nostro esempio gli intervalli sono 18. L'equidistanza delle equipotenziali si ottiene pertanto dividendo la differenza di carico complessiva 10 m per il numero di salti di potenziale 18, ottenendo il valore dell'equidistanza 0.56 m per ogni coppia di equipotenziali. In questo modo otteniamo il valore per ogni equipotenziale e sapendo che ognuna di esse incontra la falda freatica ad una quota pari al suo valore abbiamo anche la sua posizione. Per esempio, la prima equipotenziale a destra del serbatoio superiore ha un valore di 24.44m e dunque l'intersezione tra equipotenziale e falda freatica deve avere quella quota.

Spesso, sia le equipotenziali che le linee di flusso devono essere cancellate e ridisegnate più volte prima di ottenere i quadrilateri con le equipotenziali che intersecano la falda ad angolo retto e ad una quota uguale a loro valore. Anche dopo vari aggiustamenti, un reticolo di flusso disegnato a mano offre solo una soluzione approssimata alle equazioni del flusso. La Figura nel Box 4-5 offre una soluzione abbastanza precisa per gli scopi di questo testo. Il reticolo di flusso, in realtà, non fornisce la precisione che apparentemente è indicata dalle quote (due cifre dopo la virgola) ma esse sono segnate solo per indicare il valore della differenza di carico tra le successive equipotenziali.

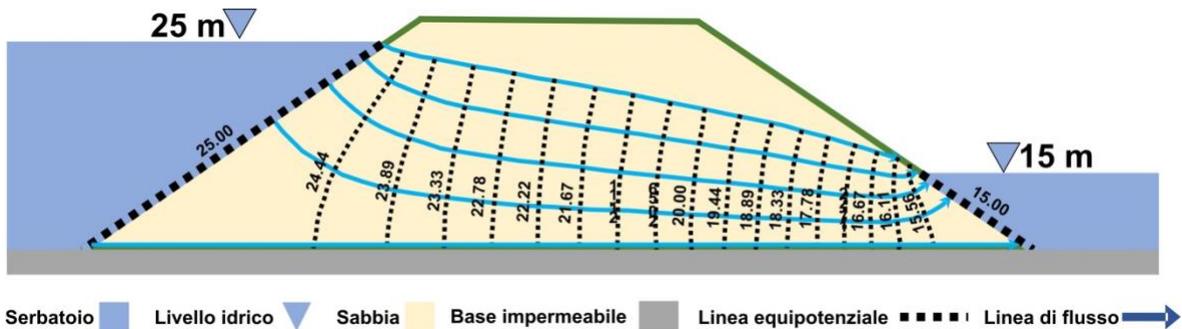


Figura Box 4-5 – Disegnare le equipotenziali per un reticolo di flusso di un acquifero freatico, assicurandosi che 1) il loro valore è simile alla quota della falda al punto di intersezione con essa ed a quello del terreno dove incontrano la superficie di filtrazione, 2) intersecano le linee di flusso ad angolo retto, e 3) la maglia ottenuta è costituita da quadrati con lati curvilinei. Il risultato si ottiene dopo avere più volte disegnato e cancellato, fino a soddisfare tutte le ipotesi.

Dato che la diga si estende per 55 m in direzione normale al disegno e la conducibilità idraulica del materiale costituente è di 0.2 m/d, la portata attraverso lo sbarramento è:

$$Q_{totale} = KH \frac{n_f}{n_d} w = \left(0.2 \frac{m}{d}\right) (10 \text{ m}) \left(\frac{4}{18}\right) (55 \text{ m}) = 24.44 \frac{m^3}{d} \sim 25 \frac{m^3}{d}$$

Pari a circa 125 fusti pieni d’acqua ogni giorno, e sarebbero necessari 100 giorni per riempire una piscina olimpica. Ricordiamo ancora che la portata determinata con la costruzione grafica del reticolo di flusso è solo approssimata.

In alternativa se avessimo iniziato a disegnare le equipotenziali con intervallo, per esempio di 1 m, vi sarebbero 10 salti di potenziale ($[25-15]/1 = 10$). In questo caso, il reticolo di flusso avrebbe meno tubi di flusso e non sarebbe stato possibile ottenere quadrati con lati curvilinei per tutti i tubi, dato che per ottenere il rapporto di $4/18=0.222$ con 10 salti di potenziale, sono necessari 2.22 tubi di flusso. Di conseguenza, uno dei tubi di flusso è pari a 0.22 della maglia quadrangolare, come indicato dal tubo di flusso più basso nella Figura del Box 4-6. Qui la portata attraverso la diga sarebbe:

$$Q_{totale} = KH \frac{n_f}{n_d} w = \left(0.2 \frac{m}{d}\right) (10 \text{ m}) \left(\frac{2.22}{10}\right) (55 \text{ m}) = 24.42 \frac{m^3}{d} \sim 25 \frac{m^3}{d}$$

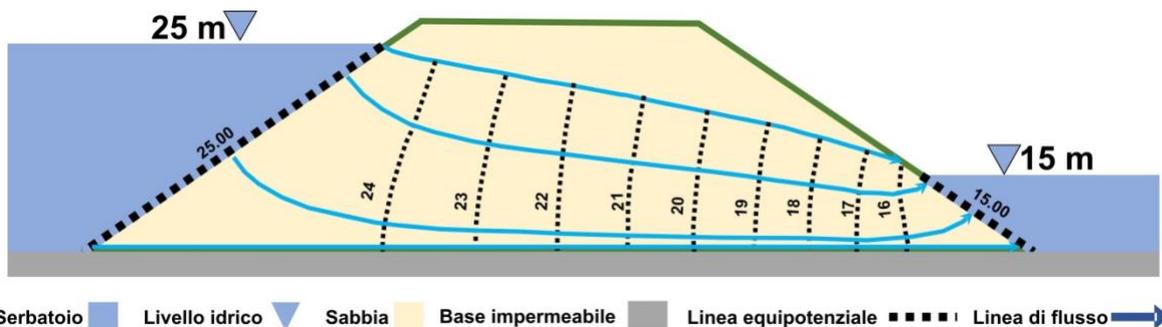


Figura Box 4-6 – Alcuni reticoli di flusso possono mostrare tubi di flusso parziali, come si verifica per quello molto stretto alla base del disegno. Il campo di moto ha 10 salti di potenziale 2.22 tubi di flusso.

[Ritorno al link del Box 4](#) ↑

Box 5 - Tracciamento del Reticolo di Flusso in Mezzi Anisotropi

Nei mezzi anisotropi la conducibilità idraulica varia con la direzione. Equipotenziali e linee di flusso in questo caso non si incrociano ad angolo retto. Nonostante questo e se la conducibilità idraulica varia in direzione allo stesso modo nel sistema (in altre parole è “omogeneamente anisotropa”) si può ricostruire un reticolo di flusso secondo il metodo grafico. In queste situazioni il campo di moto si può disegnare in tre fasi (1) trasformando la geometria del sistema in uno isotropo, (2) disegnando un reticolo di flusso per un mezzo isotropo, e (3) riportando il reticolo all’originaria situazione anisotropa.

Per comprendere la logica che sta alla base della trasformazione geometrica è utile considerare come la conducibilità idraulica varia con la direzione. Quando misuriamo la conducibilità idraulica di una carota di terreno poroso lungo il suo asse longitudinale, ricaviamo una conducibilità idraulica (K_d) lungo quella direzione. Se la conducibilità idraulica è anisotropa allora K_d varia con la direzione. La direzione nella quale K_d raggiunge il valore massimo è la direzione massima principale. In questo caso K_d viene indicata come K_{max} . Normale a questa direzione di massimo troviamo il valore minimo di K_d indicato come K_{min} . Il disegno e la spiegazione della variazione ellittica della conducibilità idraulica sono spiegati nel [testo di Groundwater Project](#) (Woessner and Poeter, 2020).

Un diagramma con coordinate polari è utile per illustrare K_d . In questo tipo di grafici si riporta la radice quadrata di K_d in tutte le direzioni rispetto alla distanza dall’origine. In caso di isotropia si ottiene un cerchio. Nella situazione di anisotropia si ottiene l’ellisse della conducibilità idraulica (Figura del Box 5-1a). Gli assi maggiore e minore sono allineati rispettivamente lungo le direzioni massima e minima di K_d . In generale, l’ellisse può avere qualunque orientazione. La Figura del Box 5-1b, mostra il caso in cui gli assi maggiore e minore dell’ellisse sono allineati con un sistema di coordinate rettangolari (x - y). K_{max} e K_{min} si possono indicare con K_x e K_y (quando K_{max} è associato alla direzione x) o K_y and K_x (quando K_{max} è associato alla direzione y). La trasformazione geometrica illustrata in basso è per questo tipo di disposizione.

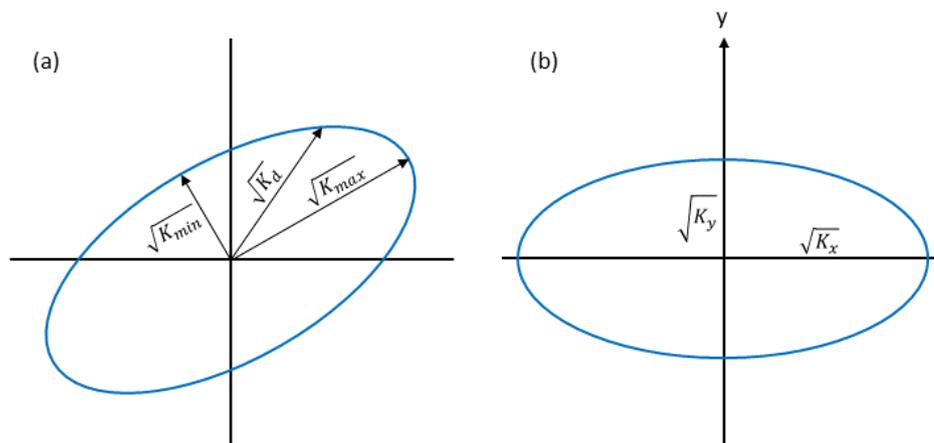


Figura Box 5-1 – Ellisse della conducibilità idraulica (a) orientamento generale (b) assi maggiore e minore allineati col sistema di coordinate rettangolari (x - y).

La trasformazione geometrica da un mezzo anisotropo ad uno isotropo può essere considerata come quella dall'ellisse al cerchio di conducibilità idraulica. Per ottenere questo si può operare sull'asse y o sull'asse x . Quando trasformiamo l'asse y , moltiplichiamo la coordinata y dell'ellisse per il rapporto $\sqrt{K_x}/\sqrt{K_y}$. In altri termini, ogni punto (x,y) nel sistema di coordinate originale viene spostato in un punto (x,Y) della trasformazione dove Y è definito dall'Equazione del Box 5-1.

$$Y = y \frac{\sqrt{K_x}}{\sqrt{K_y}} \quad (\text{Box 5-1})$$

Se K_y è minore di K_x il cerchio sarà più largo dell'ellisse originale (lo circonda), mentre se K_y è maggiore di K_x il cerchio sarà più piccolo dell'ellisse originale e l'ellisse circonda il cerchio.

In alternativa possiamo moltiplicare la coordinate x dell'ellisse per il rapporto $\sqrt{K_y}/\sqrt{K_x}$. Ogni punto (x,y) nel sistema di coordinate originali si sposta ad un altro (X,y) nel sistema trasformato dove, X è dato dall'Equazione nel Box 5-2.

$$X = x \frac{\sqrt{K_y}}{\sqrt{K_x}} \quad (\text{Box 5-2})$$

Entrambe le soluzioni portano ad una geometria sufficientemente precisa per un sistema isotropo, come mostrato nella Figura del Box 5-2.

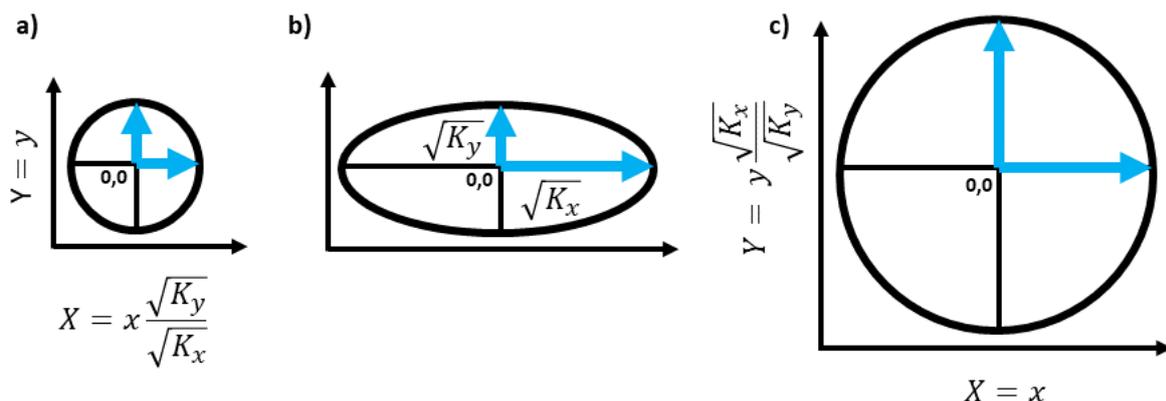


Figura Box 5-2 – Trasformazione dell'ellisse di conducibilità idraulica anisotropa (al centro) in una isotropa (cerchio) operando sull'asse x (a sinistra) o y (a destra).

Qui sotto presentiamo un esempio per rendere più chiaro il processo. Supponiamo di voler disegnare un reticolo di flusso per un campo irrigato da una serie di dreni paralleli come nella Figura del Box 5-3. I dreni sono lunghi 100 m. La conducibilità idraulica orizzontale è $K_x = 0.16$ m/d e quella verticale $K_y = 0.01$ m/d. La superficie del terreno è 0.6 m sopra il basamento roccioso, ed i centri dei dreni circolari di 0.1 m di diametro sono 0.2 m sopra la roccia (la base di ogni dreno è a 0.15 m e la sommità a 0.25 m). Il substrato roccioso è il piano di riferimento a quota 0.0 m. Supponiamo che il campo si allaghi fino ad un livello d'acqua di 0.8 m sopra il substrato.

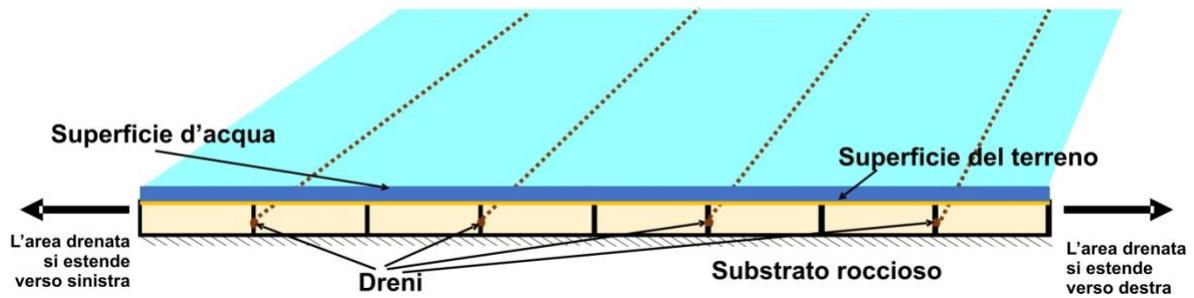


Figura Box 5-3 – Acquifero al di sotto di un campo irrigato con lunghi dreni paralleli.

Dato che la distribuzione del flusso si ripete uguale attraverso il campo, è sufficiente disegnare un elemento base per studiare l'intero sistema. (Figura del Box 5-4).

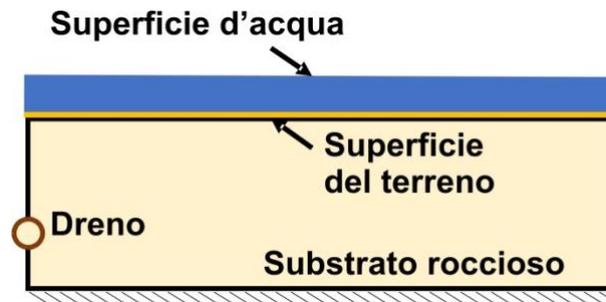


Figura Box 5-4 E' sufficiente disegnare solo una porzione del campo con i dreni paralleli per studiare l'intero reticolo di flusso. Uno spartiacque idrogeologico (limite a flusso zero) è situato a metà strada tra due dreni vicini. Inoltre il flusso verso il dreno a sinistra è la copia speculare di quello a destra. Questa simmetria ci permette di studiare il flusso verso il dreno solo da una parte. Il reticolo di flusso sviluppato per questa figura si ripeterà per tutti gli altri dreni con distribuzioni alternate.

La conducibilità idraulica orizzontale è 16 volte più alta di quella verticale, $K_x = 16 K_y$, quindi il rapporto tra i semiassi dell'ellisse è $\sqrt{K_x}/\sqrt{K_y} = \sqrt{0.16}/\sqrt{0.01} = 4$. Per effettuare la conversione da sistema anisotropo ad isotropo possiamo allungare il disegno verticalmente di un fattore 4. Lasciamo le ordinate x come sono e moltiplichiamo le y per 4. La quota del terreno passa da 0.6 m a 2.4 m; la sommità del dreno passa da 0.25 m a 1 m; il fondo da 0.15 m a 0.6, mentre il substrato resta a 0 ($4 \times 0 = 0$). Il campo di moto ottenuto ha la stessa profondità ma è 4 volte più alto di quello anisotropo. La sezione del dreno diventa ovale (Figura del Box 5-5).

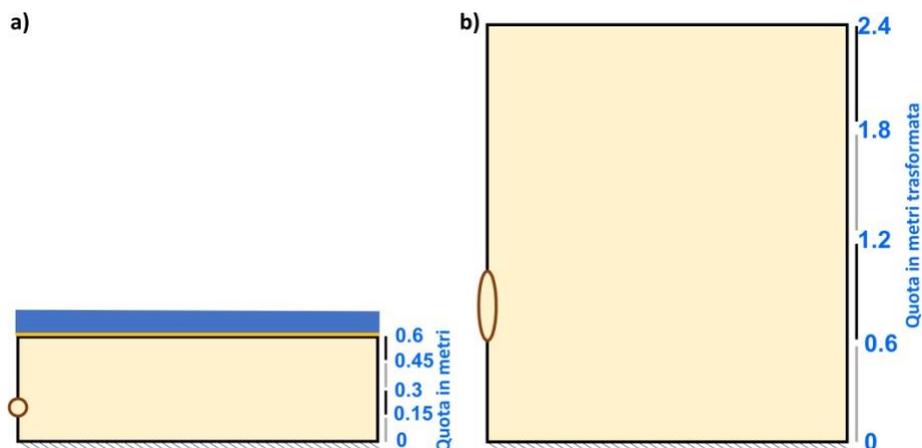


Figura Box 5-5 – Trasformazione geometrica di (a) Sistema anisotropo a sinistra in (b) Sistema isotropo a destra, modificando l'asse verticale. Rispetto a quella a sinistra, la geometria modificata di quella a destra è 4 volte più alta e larga uguale. La sezione del dreno circolare diventa ovale.

Costruiamo ora un reticolo di flusso per la sezione trasformata (Figura nel Box 5-6) secondo quanto descritto nella sezione 2.2 di questo libro e per una situazione di isotropia. Sappiamo che il carico idraulico alla superficie del terreno è uguale alla quota d'acqua nel campo irrigato (0.8 m). Ipotizziamo una pressione atmosferica nel dreno (l'acqua scorre nel dreno e poi fuoriesce rimanendo a pelo libero in tutto il tratto). Il carico idraulico è la somma

del carico di pressione, in unità di lunghezza, e della quota. La pressione atmosferica rappresenta il valore zero di riferimento per quantificare la pressione, quindi a livello dreno la pressione è zero e il carico uguale alla quota. Di conseguenza il carico idraulico alla sommità del dreno è 0.25 m, a metà è 0.2 m ed al fondo 0.15 m. L'acqua deve fluire dalla superficie del terreno verso il dreno e così possiamo disegnare le linee di flusso e le equipotenziali modificandole fino ad ottenere la maglia costituita da quadrilateri (quadrati con lati curvilinei) (Figura del Box 5-6).

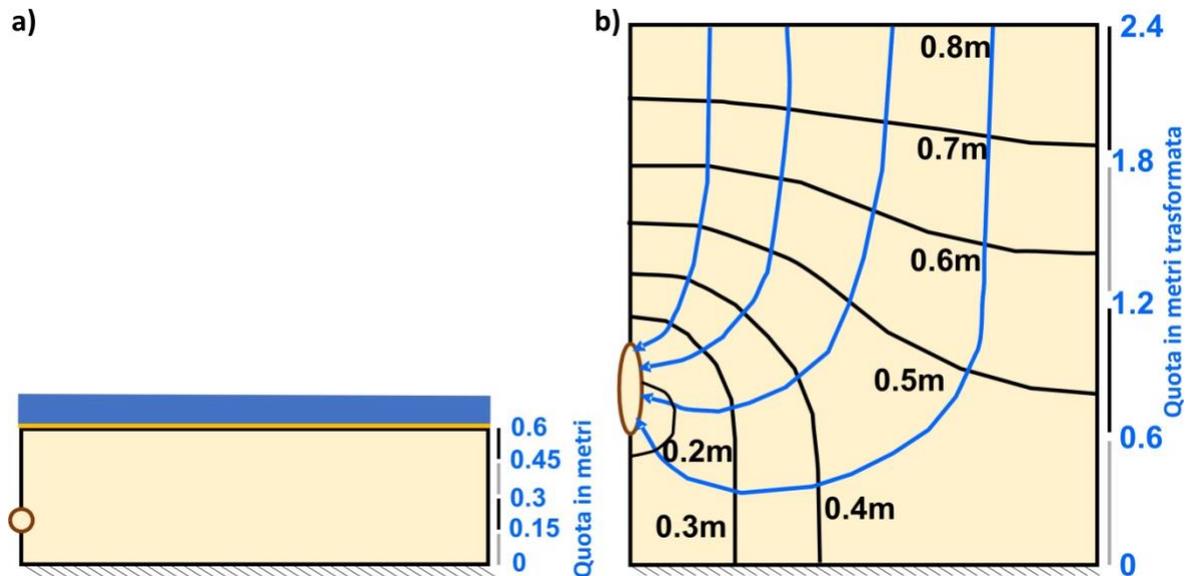


Figura Box 5-6 – Un reticolo di flusso anisotropo viene trasformato in uno isotropo (b) a destra.

Fatto questo riportiamo la sezione al suo sistema di coordinate originale (Figura del Box 5-7). Per fare questo spostiamo le coordinate x e y dove si intersecano le equipotenziali e le linee di flusso, dividendo la y per 4, portando il punto d'intersezione alla posizione x originaria e la y ridotta sul sistema originario. Una volta riportati i punti d'intersezione si possono collegare le linee. Le equipotenziali e trasformate e le linee di flusso non si incontrano ad angolo retto e le maglie non sono quadrate nel mezzo anisotropo (Figura del Box 5-7).

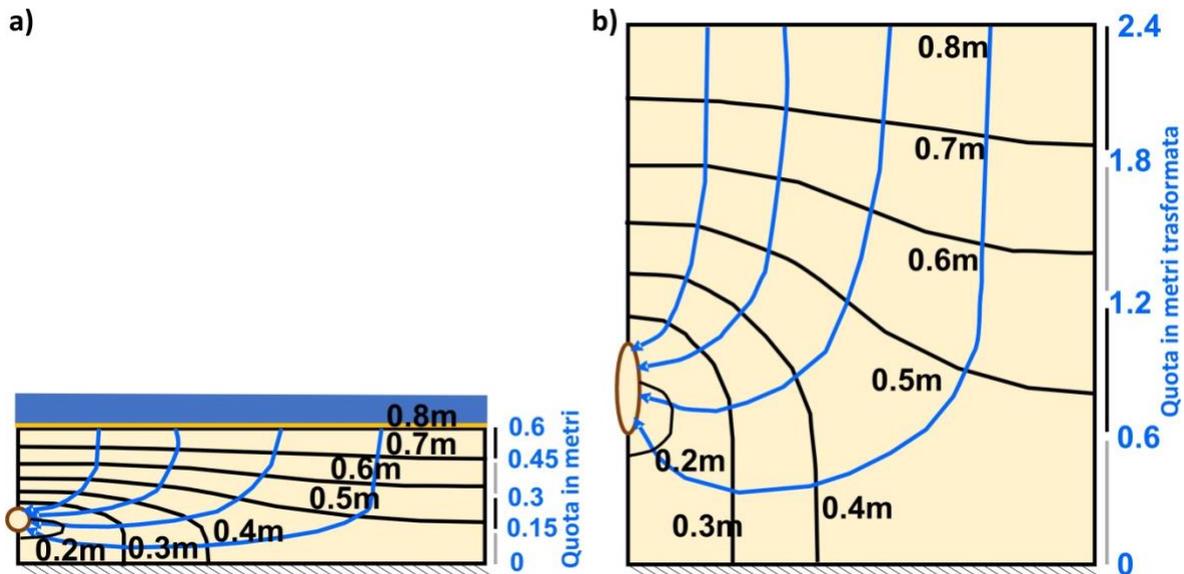


Figura Box 5-7 – La figura (b) a destra, reticolo di flusso isotropo, viene ritrasformata in una geometria anisotropa (a) a sinistra.

In ultima, ricaviamo la portata attraverso il sistema di flusso. Per ottenere questo utilizziamo la formula dell’Equazione nel Box 5-3 che è discussa nel Box 4 di questo testo.

$$Q_{totale} = K H \frac{n_f}{n_d} w \tag{Box 5-3}$$

dove:

- Q_{totale} = portata attraverso il sistema (L^3/T)
- K = conducibilità idraulica del mezzo poroso (L/T)
- H = differenza di carico idraulico nel reticolo di flusso (L)
- n_f = numero di tubi di flusso (adimensionale)
- n_d = numero di salti di potenziale (adimensionale)
- w = distanza del sistema in direzione normale al disegno (profondità) (L)

Quando applichiamo l’Equazione del Box 5-3 ad un mezzo anisotropo, dobbiamo utilizzare una conducibilità idraulica equivalente per simulare i diversi valori nelle direzioni orizzontale e verticale. La conducibilità idraulica equivalente in un mezzo anisotropo è riportata nell’Equazione del Box 5-4.

$$K_{equivalente} = \sqrt{K_x K_y} \tag{Box 5-4}$$

Utilizzando l’Equazione del Box 5-4, la conducibilità idraulica equivalente per il campo di moto della Figura nel Box 5-7a, è:

$$K_{equivalente} = \sqrt{K_x K_y} = \sqrt{\left(0.16 \frac{m}{d}\right) \left(0.01 \frac{m}{d}\right)} = 0.04 \frac{m}{d}$$

La differenza complessiva di carico idraulico, H , è di 0.6 m (carico idraulico alla superficie del terreno, 0.8 m, a cui sottrarre 0.2 m, carico medio lungo il dreno). Il valore

medio lungo il dreno è di 0.2 m poichè il carico idraulico alla sommità del dreno è 0.25 m, quello al centro 0.2 m ed al fondo 0.1 m.

La portata totale verso una parete del dreno si calcola con l'Equazione del Box 5-3 ed una conducibilità idraulica equivalente di 0.04 m/d, una differenza di carico idraulico totale H di 0.6 m, 5 tubi di flusso (n_f), 7 salti di potenziale (n_d), ed una lunghezza del dreno, w , di 100 m:

$$Q_{totale} = K H \frac{n_f}{n_d} w$$

$$Q_{totale} = \left(0.04 \frac{\text{m}}{\text{d}}\right) (0.6 \text{ m}) \left(\frac{5}{7}\right) (100 \text{ m}) \sim \left(1.7 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right) \left(1000 \frac{\text{litri}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{1}{1440} \frac{\text{d}}{\text{min}}\right) \sim 1.2 \frac{\text{litri}}{\text{min}}$$

La portata va raddoppiata per tenere conto delle due pareti del dreno, quindi otteniamo circa 2.4 litri al minuto.

$$\text{Portata da entrambe le pareti del dreno} = Q_{totale-entrambe-parti} = 2 Q_{totale} \sim 2.4 \frac{\text{litri}}{\text{min}}$$

Una tubazione di 0.3 m di diametro può trasportare 50 litri al minuto a pelo libero, pertanto la nostra ipotesi di partenza per un dreno a pressione atmosferica era giustificabile.

L'anisotropia si può ritrovare sia in un reticolo di flusso orizzontale che verticale. La prima è in genere, il risultato di una struttura del mezzo con direzioni preferenziali, come ad esempio i piani di frattura. La procedura di costruire il reticolo di flusso è simile. Le direzioni principali di flusso in pianta non sono però sempre ovvie come per il flusso in sezione verticale (vedi l'esempio sopra). Le direzioni principali in sezione verticale, spesso, ma non sempre, sono considerate orizzontali e verticali perché molte strutture sedimentarie sono costituite da livelli orizzontali. Al contrario, le direzioni principali di flusso in una rappresentazione in pianta non sono sempre allineate est - ovest o nord - sud. In un sistema anisotropo, in pianta, è necessario conoscere le direzioni principali ed allineare le coordinate $x-y$ a queste. A questo punto possiamo operare la trasformazione geometrica per la costruzione del reticolo di flusso.

[Ritorno al link del Box 5](#) ↑

Box 6 - Costruire e Studiare I Sistemi di Flusso regolati dalla Topografia

Introduzione

La versione online di TopoDrive può essere usata in un web browser e non richiede alcun plug-in.

POTETE ANDARE DIRETTAMENTE A [Utilizzare il Modello](#) ↓
SE CONOSCETE GIÀ L'USO DI TOPODRIVE

In un sistema di flusso regolato dalla topografia l'acqua scorre da zone di ricarica a quote maggiori (con carico idraulico più elevato) verso zone di recapito a quote più basse (dove il carico idraulico è minore). I limiti del nostro campo di moto sono (vedi la Figura del Box 6-1):

- Il limite superiore (AB) è la falda freatica, vicina alla superficie del terreno.
- I due limiti verticali (BC e AD) sono considerati impermeabili.
- Il limite inferiore (CD) è anch'esso impermeabile.



Figura Box 6-1 – Schema del sistema di flusso in TopoDrive

Il limite a flusso zero A-D-C-B potrebbe essere un affioramento roccioso che contorna il bacino. Il limite verticale BC può comunque essere anche uno spartiacque idrogeologico su di una zona elevata. Allo stesso modo il punto A potrebbe rappresentare un fiume e la falda scorre verso il fiume da entrambe le rive creando un limite a carico costante lungo AD. **Nota importante:** Quando si specifica la posizione della falda freatica le entrate e le uscite sono in equilibrio.

Equazione Fondamentale

L'equazione di flusso in regime di equilibrio da risolvere è:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

con h carico idraulico, mentre K_x e K_z sono i valori di conducibilità idraulica principali lungo i semiassi dell'ellisse. Le direzioni principali sono paralleli agli assi x e z .

Condizioni ai Limiti

Supponendo di conoscere la posizione della falda freatica, lungo il limite (AB) abbiamo

$$h = z$$

dove z è la quota della falda.

Lungo i limiti verticali BC e AD, la condizione di flusso nullo è

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

Lungo il limite inferiore CD, la condizione di flusso nullo è

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0$$

Dopo avere ricavato il carico idraulico h , calcoliamo le componenti x e z del vettore lineare di velocità

$$v_x = \frac{K_x}{n} \frac{\partial h}{\partial x} \quad v_z = \frac{K_z}{n} \frac{\partial h}{\partial z}$$

Dove n è la porosità. I vettori velocità sono utili per calcolare i percorsi ed il movimento per convezione delle particelle fluide.

Utilizzare il Modello

Aprire il programma collegandosi a <https://tdpfonline.net> e cliccare su "Launch TopoDrive" per iniziare ad utilizzare il software TopoDrive. TopoDrive compare in una nuova finestra del browser (vedi Figura del Box 6-2).

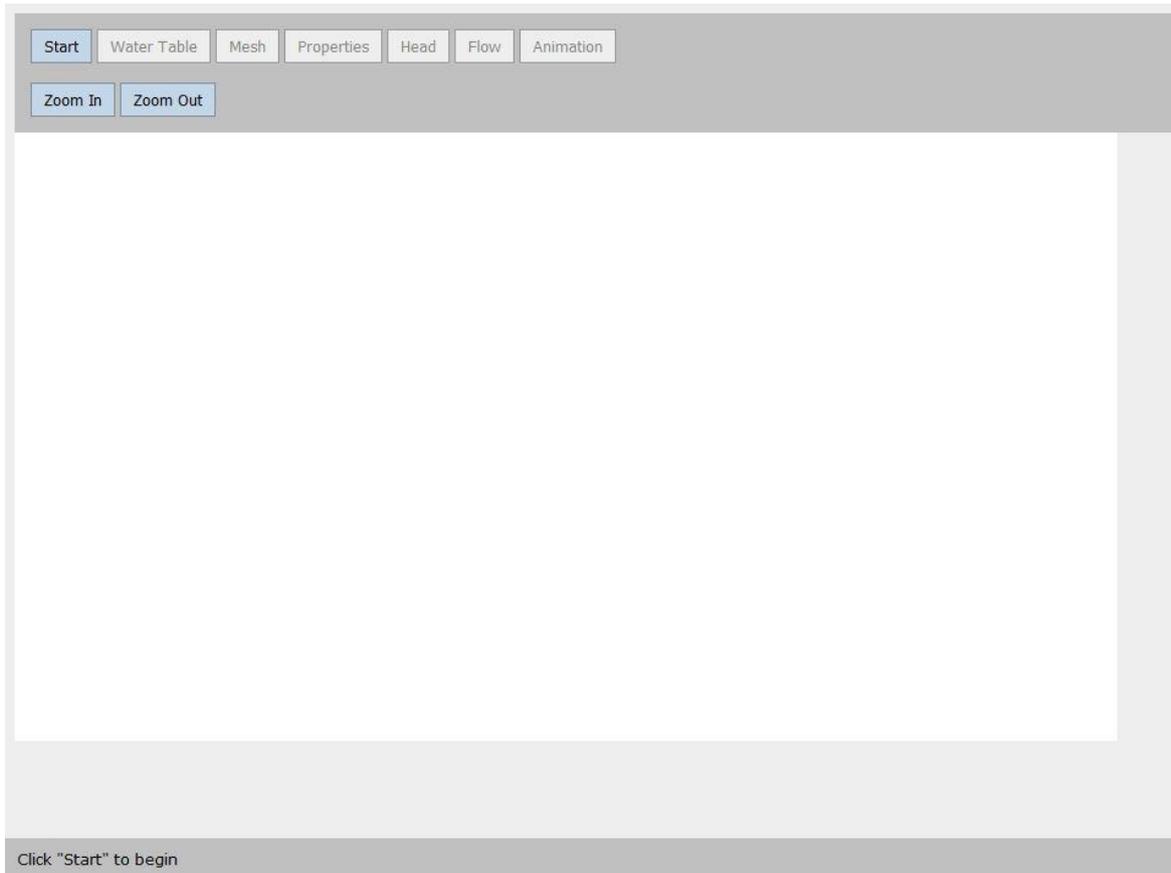


Figura Box 6-2 – Finestra del programma TopoDrive.

L'utilizzo del programma richiede 7 fasi. Per iniziare ogni fase cliccare sul bottone corrispondente sulla parte superiore di ogni finestra (Figura del Box 6-3). Compare una finestra di dialogo per inserire i dati necessari di input. I tre bottoni sulla seconda fila permettono di ingrandire o rimpicciolire l'immagine. Per uscire dal programma, chiudere semplicemente la finestra del browser.

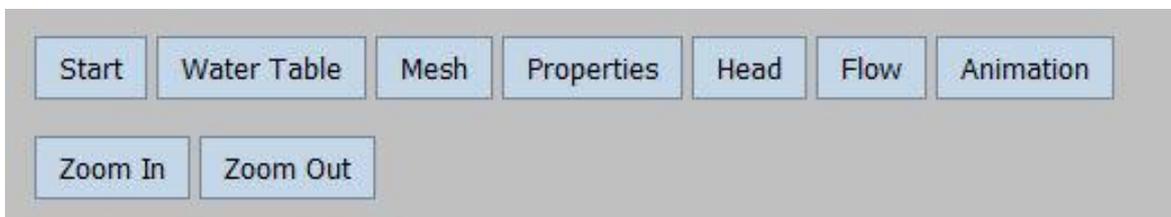


Figura Box 6-3 – I bottoni di TopoDrive.

- Step 1: Start – Inserisce le dimensioni del modello
- Step 2: Water Table – Inserisce la posizione della falda freatica
- Step 3: Mesh – Inserisce il numero di colonne e file delle celle
- Step 4: Properties – Inserisce la conducibilità idraulica e la porosità
- Step 5: Head – Calcola il carico idraulico

Dopo aver calcolato i carichi idraulici abbiamo due possibilità. Si può andare alle fasi 6a/7a o 6b/7b

Step 6a: Flusso (Percorso) – Traccia le linee di flusso a partire da un punto scelto

Step 7a: Animazione – è una sequenza animata del movimento delle linee di flusso

Oppure:

Step 6b: Flusso (Particella) – mostra la distribuzione iniziale delle particelle fluide

Step 7b: Animazione – è una sequenza animate dello spostamento per convezione delle particelle

Altri comandi possono essere utilizzati per ingrandire o rimpicciolire. Il comando “Print” del web browser si può usare per stampare l’immagine visibile nella finestra. Quando si chiude la finestra del browser termina il programma.

Qui di seguito alcuni suggerimenti se non vi sentite sicuri su come procedere:

Esempio 1

*Step 1: Cliccare sul bottone **Start** e poi inserire i dati: Lunghezza del dominio: **1000** Rapporto dimensionale: **1***

*Step 2: Cliccare il bottone **Water Table**, quindi posizionare il cursore a sinistra dell’asse sinistro in basso e cliccare, spostare il cursore a destra nell’area modellata e cliccare, continuare così muovendo il cursore a destra, sempre nell’area di studio disegnando la linea della falda, infine spostare il cursore a destra dell’asse destro e cliccare per terminare il disegno del limite superiore del modello. La porzione superiore del limite verticale in entrambi i lati viene così tagliata per completare la linea tracciata. Questa linea ora definisce la falda freatica e quindi i carichi idraulici della parte superiore del modello.*

*Step 3: Cliccare il bottone **Mesh** ed inserire i dati: Numero di colonne: **60** Numero di righe: **30***

*Step 4: Cliccare il bottone **Properties**: Inizialmente tutte le maglie hanno la conducibilità idraulica pari a quella nel rettangolo bianco. Cliccare il rettangolo azzurro e quindi OK. Posizionare il cursore sulle maglie e disegnare un poligono cliccando sui vertici. Un clic doppio sull’ultimo vertice completa il disegno. In questo modo abbiamo disegnato una zona ad alta conducibilità idraulica all’interno del modello. Cliccare di nuovo il bottone **Properties** e quindi sul rettangolo di colore rosa. Disegnare un altro poligono tra le maglie per definire una zona a bassa conducibilità idraulica. Un altro modo per completare il poligono è quello di fare un singolo clic sull’ultimo vertice e poi un altro sul bottone **Done Polygon**. Potete cambiare il valore di conducibilità idraulica in base ai colori mostrati, potete scegliere se il mezzo è isotropo od anisotropo e specificare la conducibilità idraulica lungo l’asse orizzontale e verticale. Analogamente potete modificare la porosità, anche se questo non andrà ad influenzare le linee di flusso ma la velocità delle particelle idriche.*

*Step 5: Cliccare il bottone **Head** ed inserire i dati: Numero di intervalli: **40** Alla fine cliccare su **Compute***

*Step 6: Cliccare il bottone **Flow** e scegliere: ● **Tracciamento delle Particelle di Flusso***

*● **In Avanti ed Indietro OK***

*Step 7: Cliccare la **posizione all’interno del campo di moto** e la linea di flusso viene disegnata in entrambe le direzioni, a monte ed a valle del punto scelto.*

Un esempio di reticolo di flusso completato è quello della Figura nel Box 6-4. L'area in azzurro ha una conducibilità idraulica 100 volte più elevata di quella in bianco. La zona in rosa ha una conducibilità idraulica che è 1/100 di quella in bianco.

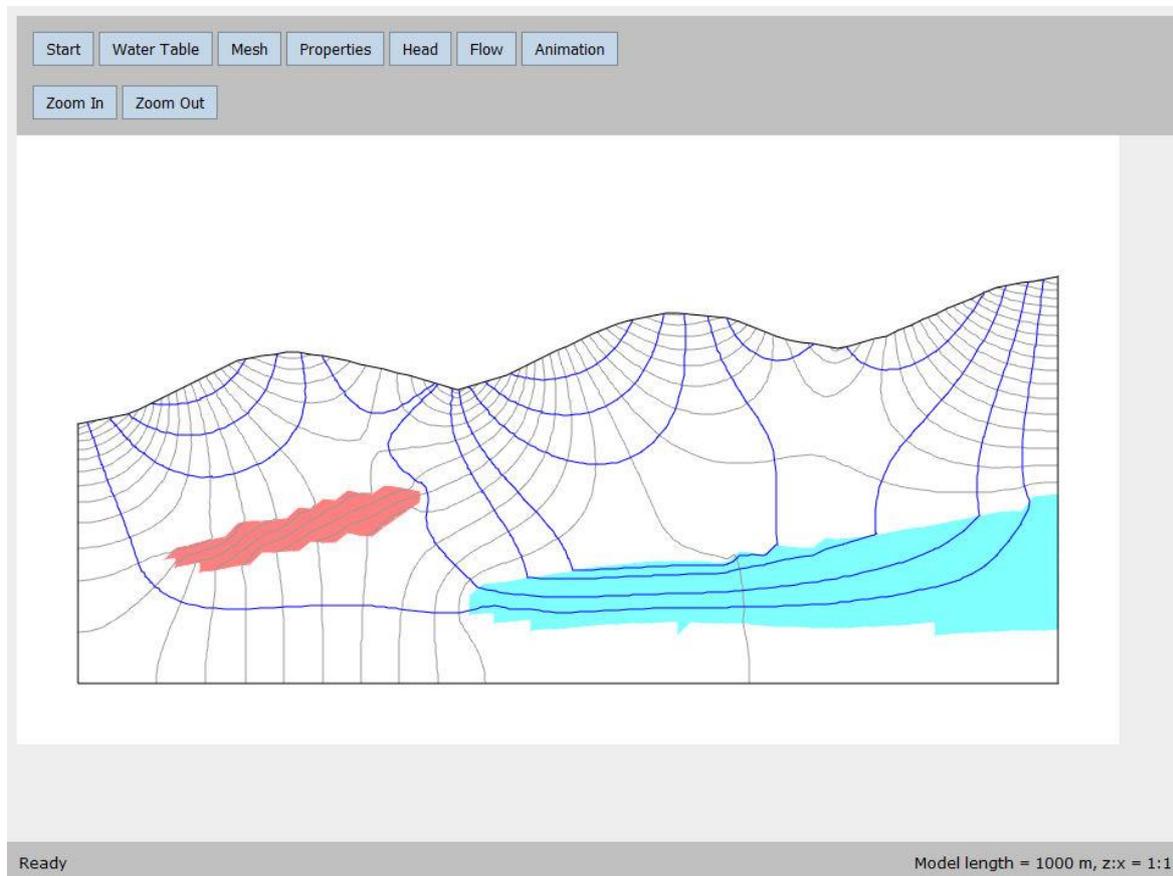


Figura Box 6-4 – Esempio di un simulazione finale con TopoDrive.

Esempio 2

Ripetere quanto già descritto dallo step 1 allo step 5 nell'esempio 1. In alternativa se avete ancora aperta la finestra di TopoDrive potete andare direttamente allo step 6 e scegliere una diversa opzione, del tipo:

*Step 6: Cliccare il bottone **Flow** ed inserire i dati: ●**Spostamento delle Particelle** Distanza iniziale tra le particelle: **5 m** OK*

Ora usare il cursore per disegnare un poligono in una zona qualunque dell'area modellata e fare un doppio clic al termine. Si potranno vedere dei punti all'interno del poligono, distanti tra loro 5 m (Figura del Box 6-5).

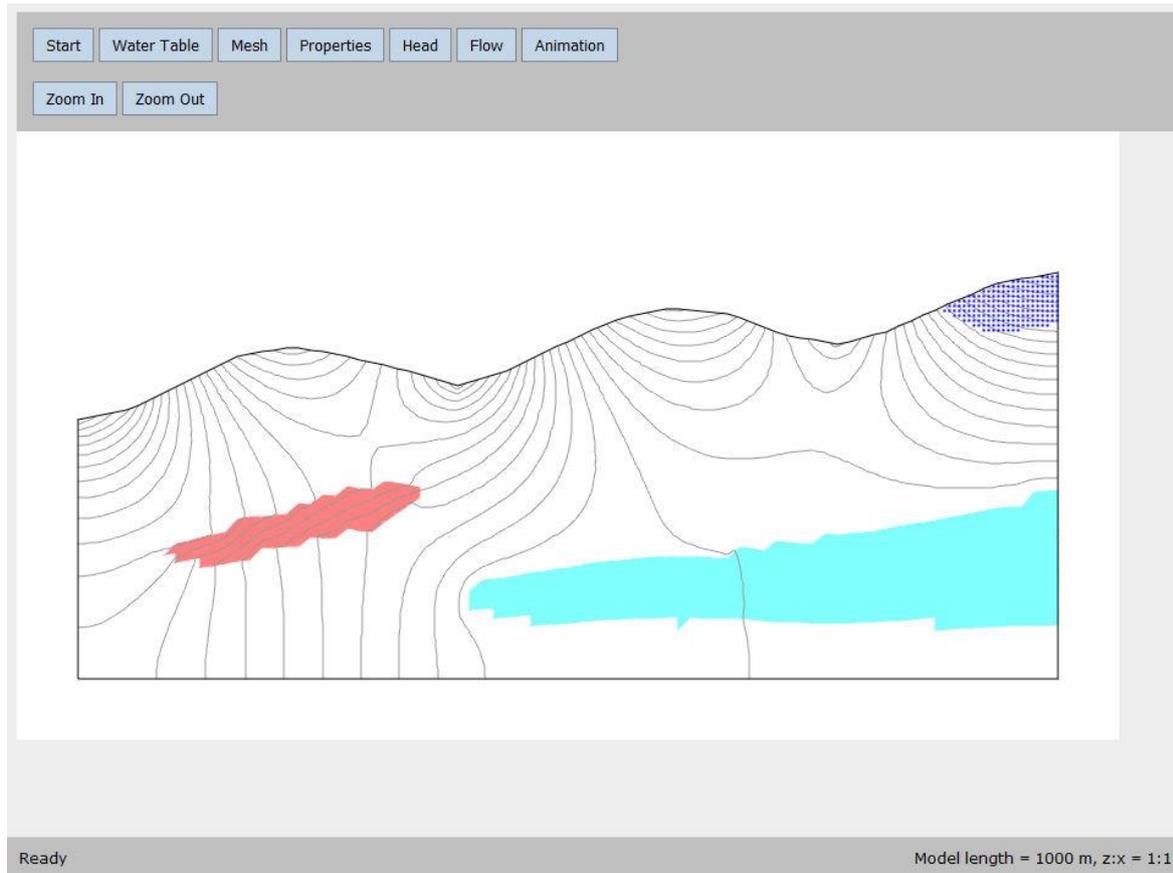


Figura Box 6-5 – Posizione iniziale di un gruppo di particelle nel modello di TopoDrive.

Step 7: Cliccare sul bottone Animation ed inserire i dati:

1 sec di animazione= 50 giorni velocità di animazione=10 fotogrammi al sec OK

Cliccare su di un punto ovunque nell'area modellata e le particelle iniziano a muoversi, se clicchiamo di nuovo nel modello le particelle si fermano, e quindi ripartono cliccando nuovamente e così via (Figura del Box 6-6).

Se abbiamo disegnato aree con diversi parametri, le particelle saranno più veloci o più lente.

In questo caso modificare il tempo di animazione rappresentato da 1 secondo di animazione.

La posizione delle particelle per l'esempio 2 è quella dopo 1460 giorni (quattro anni) nella Figura del Box 6-7. Fare attenzione che il tempo trascorso è indicato in basso nella finestra TopoDrive.

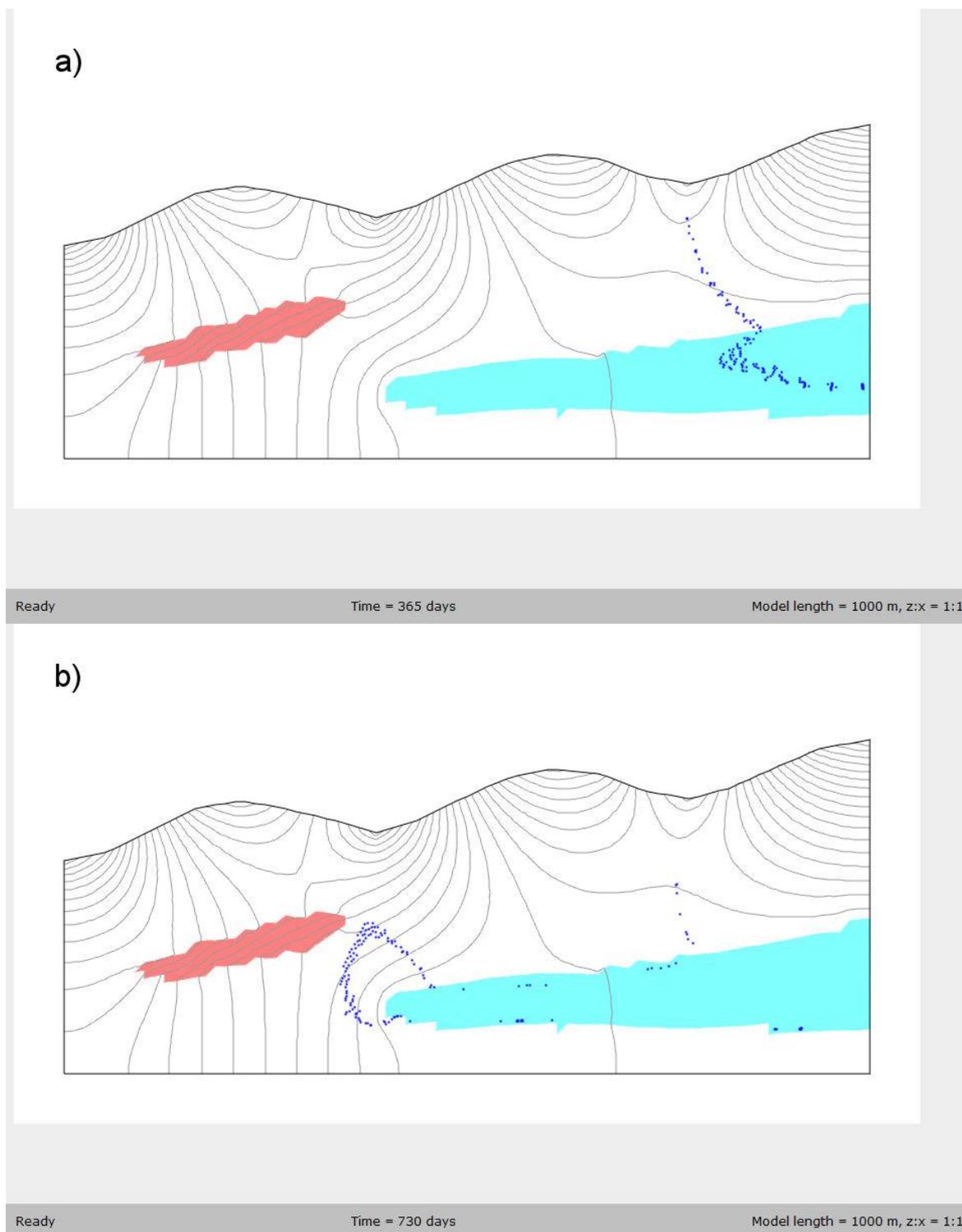


Figura Box 6-6 – Posizione delle particelle in due periodi durante l'animazione: a) 365 giorni (1 anno); e, b) 730 giorni (2 anni).

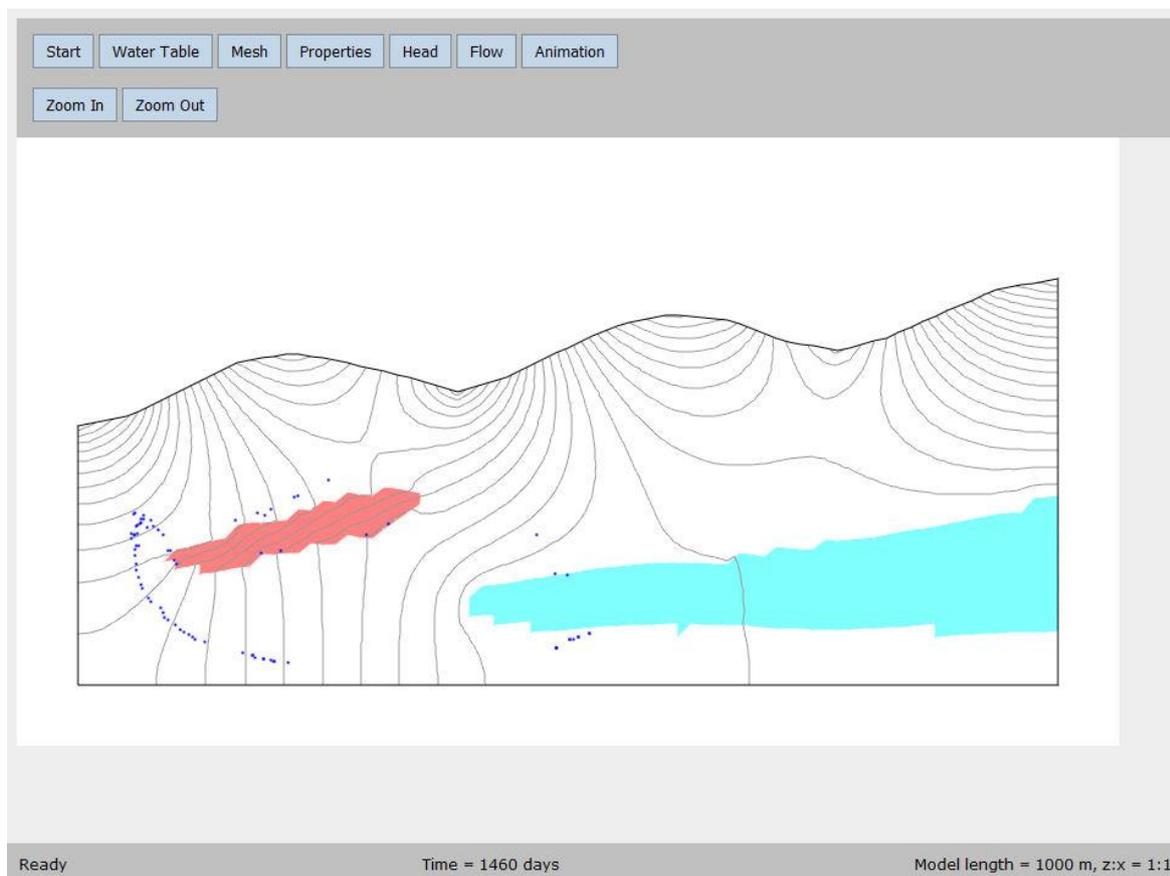
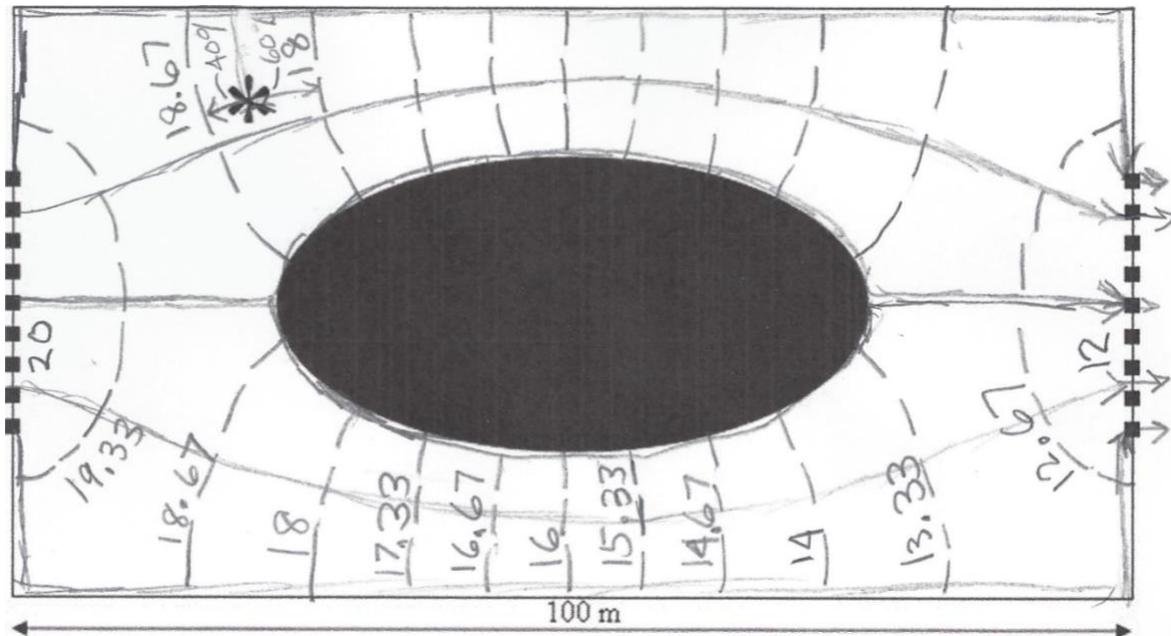


Figura Box 6-7 – Posizione delle particelle dopo 1460 giorni (4 anni). Alcune particelle sono uscite dal campo di moto. Un gruppo di particelle si muove a sinistra della zona a bassa conducibilità idraulica (area in rosa) e poche altre vi sono entrate.

[Ritorno al link del Box 6](#) ↑

6 Soluzioni degli Esercizi

Esercizio 1 - Soluzione



$$\text{equidistanza} = \frac{8 \text{ m}}{12 \text{ salti di potenziale}} = 0.66$$

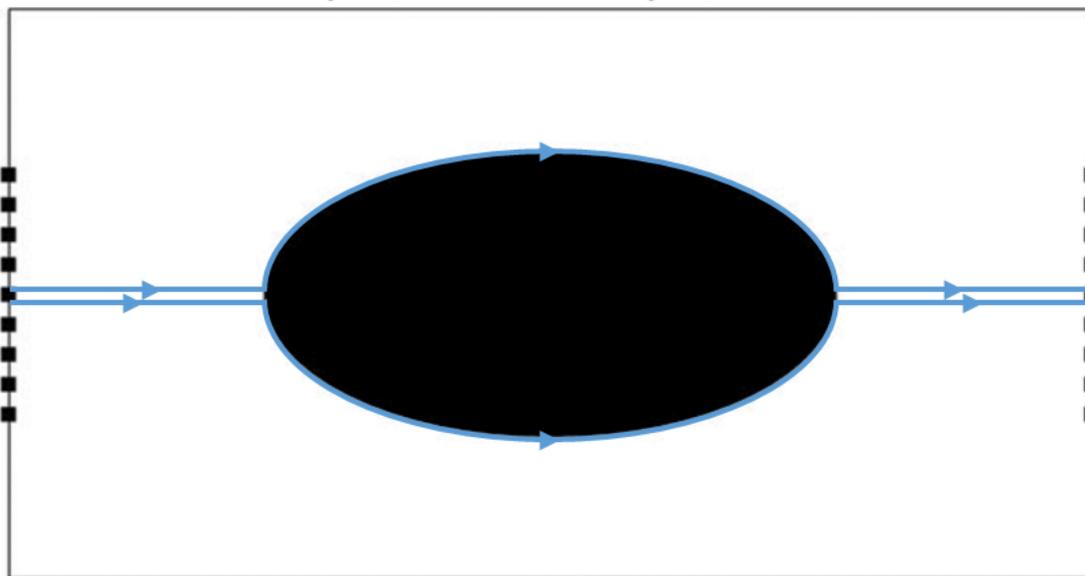
$$Q_{\text{Totale}} = KH \frac{m}{m_d} w = 1 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} \frac{8 \text{ m}}{12} \frac{4}{10 \text{ m}} = 0.026 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{carico idraulico su } * \approx 18 + 0.6 \times 0.66 \approx 18.4 \text{ m}$$

$$\text{carico di pressione} = \text{carico idraulico} - \text{quota} = 18.4 \text{ m} - 10 \text{ m} = 8.4 \text{ m}$$

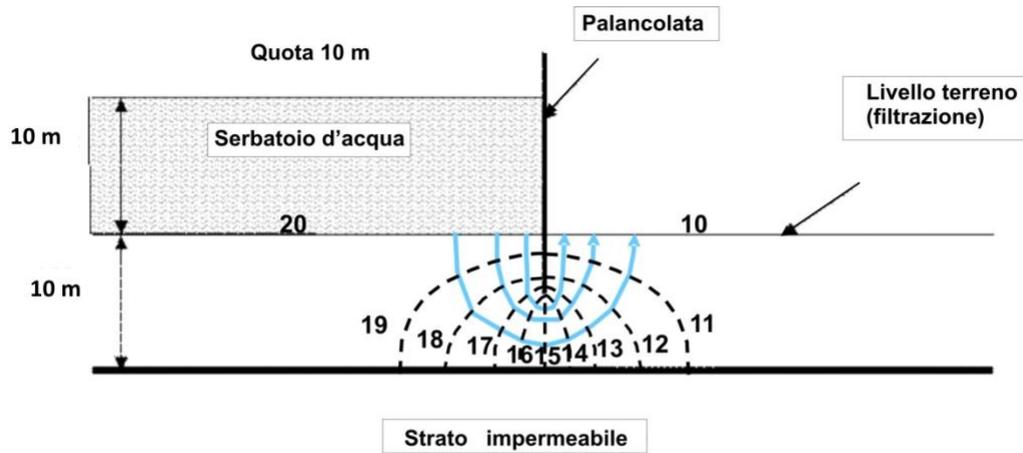
Commenti: Come si comporta la linea di flusso che inizia esattamente a metà del pannello filtrante all'ingresso? La risposta è legata alla relazione esistente tra la formulazione matematica del processo e ciò che accade in realtà. Dal punto di vista matematico la linea di flusso che esce esattamente a metà del filtro si dirige verso il pilastro. Quando la linea incontra l'ostacolo, l'analisi matematica indica che vi sono due soluzioni possibili. La linea di flusso può proseguire verso destra o sinistra del pilastro. Quando si disegnano entrambe queste possibilità c'è l'impressione che la linea si divida in due direzioni una verso destra ed un'altra verso sinistra. Questa in realtà è una concettualizzazione imprecisa. E' preferibile pensare invece a due linee di flusso, una a sinistra ed una a destra separate da un breve intervallo temporale (Figura in basso). In

questo modo non serve immaginare una linea unica che si divide in due. Non si può infatti definire una linea di flusso che inizia a metà del filtro con esattezza matematica, dato che gli oggetti reali non hanno una forma geometrica precisa. La definizione più accettabile che può essere fatta su di una linea che inizia a metà del filtro è che può dirigersi ugualmente a destra o sinistra del pilastro.



[Ritorno all'Esercizio 1](#) ↗

Esercizio 2 - Soluzione

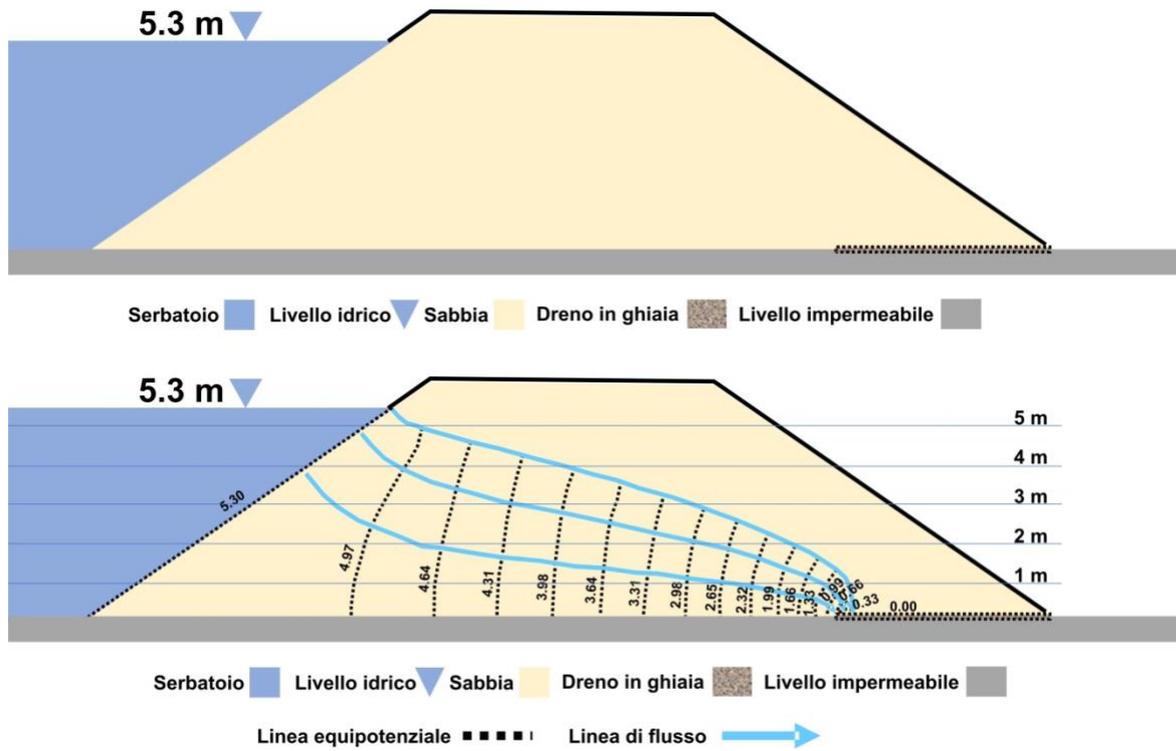


$$Q_{\text{totale}} = (2 \text{ m/giorno})(10 \text{ m})(4 \text{ tubi flusso}) / (10 \text{ salti potenziale})(22 \text{ m}) = 176 \text{ m}^3 / \text{giorno}$$

$$\text{Equidistanza isopotenziali} = (10 \text{ m}) / (10 \text{ salti di potenziale}) = 1 \text{ m}$$

[Ritorno all'Esercizio 2](#) ↗

Esercizio 3 - Soluzione



Equidistanza = (5.3 m) / (16 salti di potenziale) = 0.33125 m

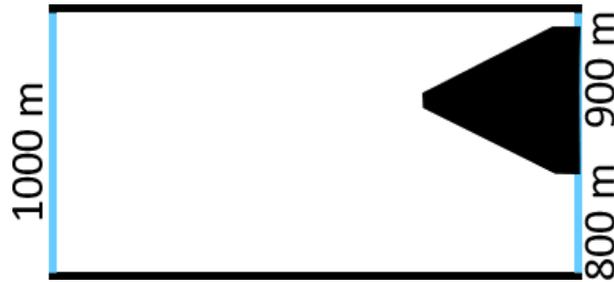
$$Q_{totale} = K H w \frac{n_f}{n_d} a_r$$

Il rapporto dimensionale è uno, e $a_r = 1$

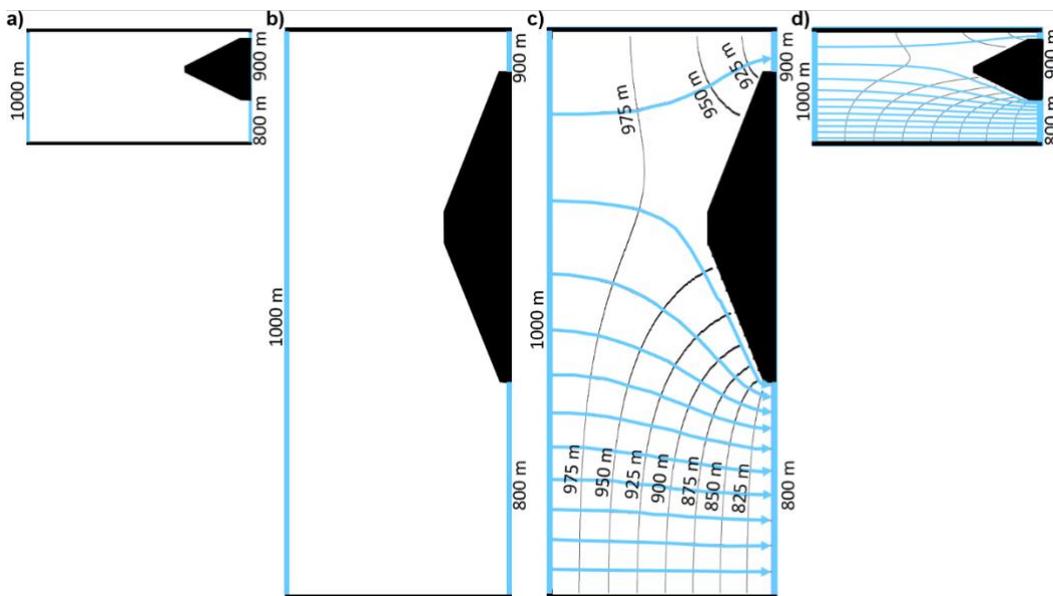
$Q_{totale} = (0.2 \text{ m/d}) (5.3 \text{ m}) (28 \text{ m}) (3 \text{ tubi di flusso}) / (16 \text{ salti di potenziale}) = 5.6 \text{ m}^3/\text{d}$

[Ritorno all'Esercizio 3](#) ↑

Esercizio 4 - Soluzione



- a) Sistema originale
- b) Il sistema può essere allungato di un fattore 5 lungo la direzione y per tenere conto dell'anisotropia, dato che $225^{0.5}/9^{0.5} = 15 / 3 = 5$
- c) Possiamo costruire un reticolo di flusso trasformato come se il sistema fosse isotropo
- d) Dopo avere disegnato le maglie e le linee di flusso riportiamo il sistema a 1/5 della larghezza per avere le linee di flusso in un mezzo anisotropo



Equidistanza = $(200 \text{ m}) / (8 \text{ salti di potenziale}) = 25 \text{ m}$

$$Q_{totale} = K H w \frac{n_f}{n_d} a_r$$

Il rapporto dimensionale è uno, e $a_r = 1$

$$K_{equivalente \text{ per reticolo di flusso anisotropo}} = (K_x K_y)^{0.5} = ((225 \text{ m/d})(9 \text{ m/d}))^{0.5} = 45 \text{ m/d}$$

$$Q_{totale} = (45 \text{ m/d}) (200 \text{ m}) (100 \text{ m}) (12 \text{ tubi di flusso}) / (8 \text{ salti di potenziale}) = 1,350,000 \text{ m}^3/\text{d}$$

[Ritorno all'Esercizio 4](#) ↑

7 Breve Profilo degli Autori

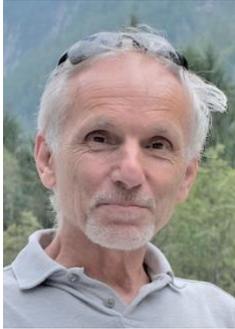


Dr. Eileen Poeter è Emeritus Professor al Dipartimento di Geological Engineering del Colorado School of Mines, dove ha insegnato nei corsi di idrogeologia e seguito più di 40 studenti laureati che hanno collaborato con lei per studi sugli acquiferi e progetti di modellazione numerica. In precedenza è stata Past Director del Integrated Groundwater Modeling Center; e Presidente in pensione dello Studio Poeter Engineering. Con 40 anni di esperienza nella modellazione degli acquiferi ha effettuato consulenze legali, per industrie, società d'ingegneria, agenzie governative, laboratori di ricerca ed associazioni di cittadini e per progetti di modellazione degli acquiferi volti a: stoccaggio e recupero; efficienza delle barriere impermeabili; sistemi di drenaggio per progetti di centrali nucleari; gestione delle acque sotterranee, utilizzo degli acquiferi a livello regionale, tenuta delle dighe, migrazione di sostanze inquinanti, conseguenze dei lavori di drenaggio, e relazioni tra acque superficiali e sotterranee. Il Dr. Poeter è autore di un programma per la modellistica delle acque sotterranee comprendente l'analisi di sensibilità, la valutazione dei dati, la calibrazione del modello, la selezione e classificazione dei modelli, e la valutazione dell'incertezza del risultato. Nel 2006 è stata Darcy Lecturer alla National Groundwater Association (NGWA) e nel 2017, ha ricevuto il premio M. King Hubbert oltre ad essere NGWA Fellow e Life Member.



Dr. Paul Hsieh è un idrologo specializzato in acque sotterranee. E' in pensione dal 2018 essendosi ritirato dopo 41 anni di servizio come idrologo ricercatore dal U.S. Geological Survey. Ha ottenuto il B.S.E. in Civil Engineering alla Princeton University, M.S. e Ph.D. alla University of Arizona in Idrologia e Risorse Idriche. Le sue attività presso l'USGS hanno interessato diversi argomenti comprendenti il flusso delle acque sotterranee e del soluto in rocce fratturate, lo sviluppo e l'applicazione dei modelli di simulazione al computer, l'interazione tra acquiferi, e terremoti e l'idrologia nei terreni vulcanici. Durante il disastro ambientale del 2010, Deepwater Horizon oil spill, ha partecipato con il gruppo scientifico governativo allo studio sulle conseguenze ambientali della catastrofe. E' Fellow della Geological Society of America e della American Geophysical Union, ed ha ricevuto la Service to America medal nel 2011 per la sua Partnership nel Public Service.

8 Breve Profilo del Traduttore



Alessio Fileccia si occupa di idrogeologia in terreni porosi, fratturati e carsici, con una lunga esperienza maturata in 15 paesi esteri, gran parte dei quali in via di sviluppo e per conto di Organismi Internazionali (EEC, WB, ADB, UNESCO). Durante la sua carriera ha potuto mettere in pratica diverse tecniche idrogeologiche: dalle valutazioni preliminari, alla programmazione ed esecuzione delle indagini, progettazione pozzi, prove su acquifero, monitoraggi. Già Consigliere Regionale dell'Ordine dei Geologi (Veneto) e professore di Idrogeologia Applicata all'Università di Trieste è autore di numerosi articoli tecnici per la rivista *Italian Journal of Groundwater*. Particolarmente interessato agli studi sul campo, la sua esperienza è rivolta principalmente a conciliare teoria e pratica ed alla divulgazione dell'idrogeologia in ambito professionale.

Vi invitiamo ad iscrivervi alla lista di the Groundwater Project per essere informati sull'uscita di nuovi testi, eventi e modalità di partecipazione. Iscrivendovi alla nostra lista ci aiutate a costruire una comunità mondiale sulle acque sotterranee. [Sign-up](#)⁷.



9 Modifiche all'edizione originale

Modifiche generali:

Sono stati corretti alcuni errori tipografici come cancellazione di spazi inutili.

Dove le unità erano "sec" or "giorni", sono state cambiate in "s" e "d".

E' stato tolto il corsivo dalle unità di misura.

Le parole nelle equazioni sono in carattere normale.

Le variabili nelle equazioni sono tutte in corsivo.

Per alcuni valori sono state inserite le parentesi con lo scopo di migliorare la chiarezza dell'equazione.

I riferimenti a (Poeter e Hsieh, 2020, gw.project.org) sono stati tolti per essere in linea con le recenti formattazioni di GW Project. Questa citazione è stata tolta dalla lista bibliografica.

Inserite piccole modifiche alla lista bibliografica per essere in linea col formato di GW-Project.

Le pagine dell'indice sono aggiornate con queste revisioni.

Modifiche particolari:

pagina i, ii, tolti alcuni caratteri maiuscoli.

pagina iii, tolte le parole chiave.

pagina iii, aggiunto il collegamento a iscriviti a Groundwater Project.

pagina iii, aggiunta informazione alla citazione.

pagina iv, modifica la scritta di Steven Moran in Stephen Moran.

pagina v-vii, aggiornato l'indice.

pagina 1, sostituito “pubblicato e narrato da Poeter 2020, gw-project.org” con “pubblicato e narrato da Eileen Poeter.”

pagina 12, Cancellato “(Equazione 2).”

pagina 16, Figura 14 didascalia. Sostituito “Simulazioni di Jiao e Liang, 2019;” con “Filmato di una simulazione del modello Hle-Shaw all’Università di Hong Kong, a cura di J. Jiao e W.Z. Liang.”

pagina 28, Tolto “Cos’è la portata specifica ?”

pagina 28, Tolto “Cos’è la velocità lineare è la porosità effettiva è 30%?”

pagina 29, Tolto il riferimento a Jiao e Liang, 2019.

pagina 29, Riferimento a Woessner e Poeter 2020. Cambiato in Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, <https://gw-project.org/books/hydrogeologic-properties-of-earth-materials-and-principles-of-groundwater-flow/>

pagine 30-31, Sostituito Replaced Ψ con ψ .

pagina 39, Sostituito “area di flusso per unità di larghezza normale alla direzione di flusso” con “larghezza del tubo di flusso sul piano della rete di flusso”.

pagina 39, La variabile q_{tube} è sostituita con Q'_{tube} . Cambiate le unità di Q'_{tube} da L^3/T a L^2/T .

pagina 39, Tolta l’equazione del Box 3-3. Tolto “1 unità di larghezza nel disegno”.

pagina 39, Definizioni di variabili dell’Equazione nel Box 3-3. Aggiunta la definizione della variabile y .

pagina 40, Tolto “e trascurando il valore di uno per l’unità di spessore nel disegno”.

pagina 40, La variabile q_{tube} è sostituita con Q'_{tube} , nella Figura Box 3-4.

pagine 40-41, La variabile q è sostituita con Q' , definite come “velocità di flusso attraverso il sistema per unità di larghezza normale al disegno (L^2/T).”

pagina 41, Sostituito “reticolo di flusso basato sul flusso” con “reticolo di flussot”.

pagine 42-43, Sostituito “Figura del Box4-4” con “Figure del Box 4-2”.

Pagina 43, Sostituito “Figura del Box 4-5” con “Figure del Box 4-3”.

pagina 43, Sostituito “Figura del Box 4-6” con “Figura del Box 4-4”.

pagine 43-44, Sostituito “Figura del Box 4-7” con “Figura del Box 4-5”.

pagina 45, Sostituito “Figura del Box 4-8” con “Figura del Box 4-6”.

pagine 46-47, Sostituito “Figura del Box5-9” con “Figura del Box 5-1”.

pagina 47, Sostituito il numero dell’equazione “Box 5-8” con “Box 5-1”.

page 47, Sostituito il numero dell’equazione “Box 5-9” con “Box 5-2”.

pagina 47, Sostituito “ogni punto (x,y) nel sistema originario di coordinate verrà spostato in un punto (X,Y) nel sistema di coordinate trasformate “con” ogni punto (x,y) nel sistema originale di coordinate verrà spostato in un punto (X,y) nel sistema di coordinate trasformate.”

pagine 47-48, Sostituito “Figura Box 5-10” con “Figura Box 5-2”.

pagina 48, Sostituito “Figura Box5-11” con “Figura Box 5-3”.

pagine 48-49, Sostituito “Figura Box5-12” con “Figura Box 5-4”.

pagina 49, Sostituito “Figura Box5-13” con “Figura Box 5-5”.

pagine 49-50, Sostituito “Figura Box5-14” con “Figura Box 5-6”.

pagine 50-51, Sostituito “Figura Box5-15” con “Figura Box 5-7”.

pagine 51-52, Sostituito il numero dell’equazione “Box 5-10” con “Box 5-3”.

pagina 51, Sostituito il numero dell’equazione “Box 5-11” con “Box 5-4”.

pagina 53, Sostituito “Figura Box 6-16” con “Figure Box 6-1”.

pagina 54, Sostituite le variabili K_{xx} e K_{zz} con K_x e K_z , rispettivamente.

pagina 57, Sostituito "Figura Box 6-44" con "Figura Box 6-4".

Pagina 58, Sostituito "(Figura Box6-)" con "(Figura Box 6-6)"

Pagina 65, Sostituito " $5^{0.5}$ " con " $9^{0.5}$ "

pagina 65, Tolto il calcolo di q e v .