

Hydrogeological characterization and parameters estimation of the aquifer close to the Adige River (Verona, Italy) for the design of deep excavations

Caratterizzazione idrogeologica e parametrizzazione idrodinamica dell'acquifero golenale del Fiume Adige (Verona, Italia) per la progettazione di scavi profondi

Valentina Vincenzi, Michele Sapigni

Riassunto: Nell'ambito della progettazione definitiva di un nuovo impianto idroelettrico presso uno sbarramento esistente sul Fiume Adige nel comune di San Giovanni Lupatoto (VR, Italia), la progettazione di scavi profondi in sedimenti sciolti sotto falda ed i connessi rischi di sifonamento e sollevamento del fondo scavo hanno reso necessario un approfondito studio di caratterizzazione idrogeologica finalizzato ad una precisa parametrizzazione dell'acquifero e quindi ad una confidente progettazione delle opere di sostegno agli scavi e dei sistemi di aggotamento. In particolare, si rendeva necessaria un'analisi tridimensionale del problema, perché il sistema idrogeologico studiato era complicato da diverse condizioni al contorno "artificiali" (sbarramento sul fiume e fondazioni profonde delle opere ingegneristiche esistenti e da progetto) che determinavano la presenza di moti di filtrazione verticale non trascurabili. Il modello concettuale è stato sviluppato applicando contestualmente diverse metodologie di prospezione: una preliminare prova di pozzo a gradini di portata, una prova pozzo-piezometri di lunga durata, una

contestuale prova di tracciamento multiplo e l'implementazione di un modello numerico tridimensionale di flusso (codice MODFLOW-2005) e trasporto advettivo (codice MODPATH). La modellazione ha permesso un'accurata stima dei parametri idrodinamici di conducibilità idraulica e porosità efficace attraverso la calibrazione delle prove di pompaggio e tracciamento in condizioni transitorie. La simulazione delle condizioni post operam ed il confronto con le condizioni ante operam, in termini di percorsi e velocità di filtrazione, hanno evidenziato che le nuove opere avrebbero determinato una sensibile riduzione delle velocità di filtrazione sotterranea in prossimità delle fondazioni dello sbarramento esistente.

Keywords: *numerical modeling, hydraulic properties, pumping tests, tracer tests, Verona (Italy).*

Parole chiave: modellazione numerica, proprietà idrodinamiche, prove di pompaggio, test con traccianti, Verona (Italy).

Abstract: *In the framework of the final design of a new hydroelectric plant close to the existing dam on the Adige River in the municipality of San Giovanni Lupatoto (VR, Italy), the design of deep excavations in loose sediments below groundwater level, and the connected risks of piping and excavation bottom heave required a detailed study of hydrogeological characterization, aimed to an accurate aquifer parameterization and so a confident design of excavation supports and dewatering systems. Particularly a three-dimensional analysis of the problem was necessary, because the hydrogeological system was complicated by many "artificial" boundary conditions (dam on the river, deep foundations of the existing and new engineering works) causing vertical not negligible flow paths. The conceptual model has been developed applying, in parallel, different prospecting tools: a preliminary Step Drawdown Test, a long duration Constant Rate Test, a multiple tracing test and the implementation of a three-dimensional numerical model of groundwater flow (MODFLOW-2005 code) and advective transport (MODPATH code). The modeling has allowed a good estimate of the aquifer parameters such as hydraulic conductivity and effective porosity through calibration of the pumping/tracing tests under transient conditions. Moreover, the simulation of post operam conditions and the comparison with ante operam, in terms of flow paths length and filtration velocity, showed that the construction of the new works foundations would have determined a sensitive reduction of groundwater velocities closed to the existing dam.*

Valentina VINCENZI ✉

Studio Geologico Vincenzi Valentina
Via Nives Gessi 3, 44122 Ferrara (Italy)
info@idrogeologiavincenzi.it

Michele SAPIGNI

Enel Green Power SpA
Via Torino 14, 30172 Mestre VE (Italy)
michele.sapigni@enel.com

Ricevuto/Received: 02 October 2018-Accettato/Accepted: 30 December 2018
Pubblicato online/Published online: 28 January 2019

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

© Associazione Acque Sotterranee 2019

Introduzione

Lo studio qui presentato è stato sviluppato a supporto della progettazione definitiva di un nuovo impianto idroelettrico presso lo sbarramento esistente sul Fiume Adige nel comune di San Giovanni Lupatoto in provincia di Verona (Fig. 1), finalizzato all'utilizzo energetico delle portate previste come Deflusso Minimo Vitale (portata massima di 70 m³/s), derivandole a monte dello sbarramento e rilasciandole immediatamente a valle dello stesso.

Il progetto prevedeva la realizzazione del nuovo impianto idroelettrico nell'area golenale in sponda destra al Fiume Adige, in prosecuzione della spalla destra dello sbarramento esistente (Fig. 2). Le nuove opere, terminate nel luglio 2017, prevedevano fondazioni ubicate a profondità variabili tra 5 e 12 metri e di conseguenza richiedevano scavi profondi sotto falda, con messa in opera di diaframmi e/o palancolate sotterranee e contestuale dewatering dei fondi scavo, sotto un significativo carico idraulico (fino a 11 m) indotto dalla presenza dello sbarramento del Fiume Adige. Tale tipologia di opere è notoriamente soggetta ai rischi di sifonamento e sollevamento del fondo scavo (Frank et al. 2005; NTC 2008; NTC 2018), fenomeni che si erano verificati durante la realizzazione della centrale esistente ubicata 7 km a valle dell'area di studio (Veder 1959). Le informazioni geologiche, geotecniche ed idrogeologiche disponibili dai documenti relativi alla costruzione della

centrale e dello sbarramento esistenti erano piuttosto datate (fine anni '50) ed insufficienti a soddisfare gli odierni requisiti minimi per la progettazione definitiva di un'opera di tale importanza. Pertanto, dopo la realizzazione di una campagna d'indagine con sondaggi, prove in sito e prove di laboratorio, si è rivelato necessario un approfondito studio idrogeologico di caratterizzazione e parametrizzazione dell'acquifero, oltre che l'analisi dei moti di filtrazione sotterranea esistenti ed indotti dagli scavi sotto falda.

Per la definizione del modello concettuale di un sistema idrogeologico apparentemente semplice, ma fortemente asimmetrico e complicato dalle condizioni al contorno e dalla complessità delle opere ingegneristiche esistenti e in progetto, si è resa necessaria l'analisi tridimensionale del sistema e l'applicazione contestuale di diverse metodologie di prospezione idrogeologica: test di pozzo SDT "Standard Drawdown Test" (SDT) e prova pozzo-piezometri di lunga durata "Costant Rate Test" (CRT) con contestuale esecuzione di una prova di tracciamento multiplo, oltre all'implementazione di un modello numerico tridimensionale per la calibrazione delle prove in condizioni transitorie. Inoltre, la modellazione numerica ha avuto lo scopo di determinare i valori di porosità efficace attraverso la calibrazione della prova di tracciamento e di eseguire un confronto delle velocità di flusso tra ante e post operam.

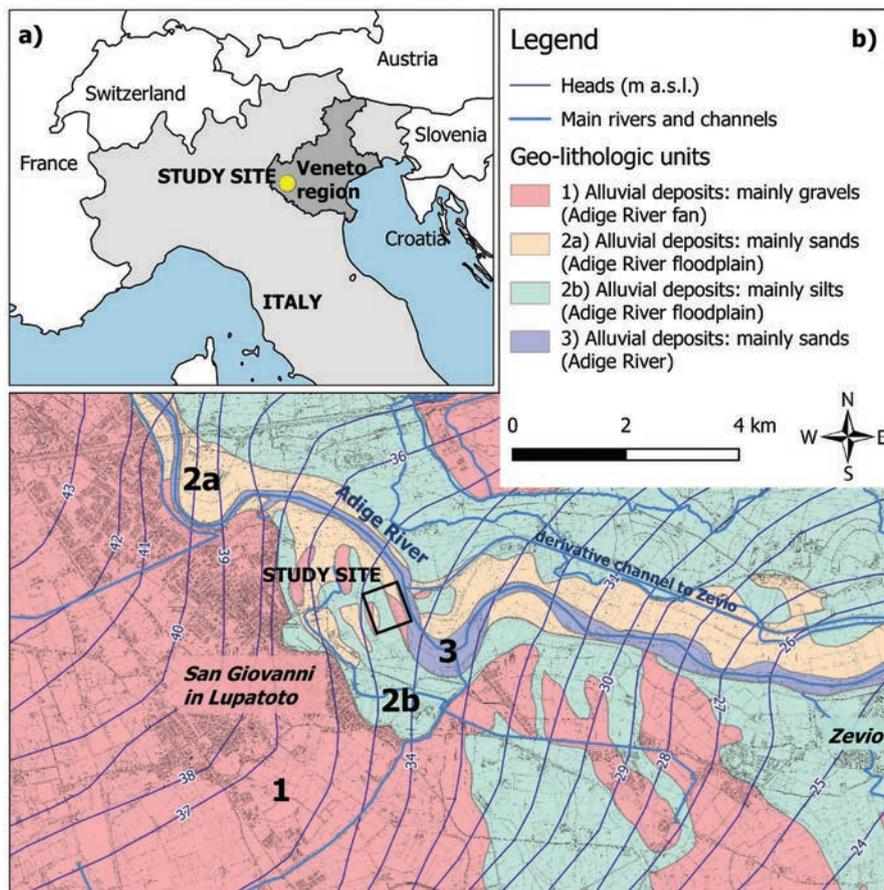


Fig. 1 - (a) Inquadramento geografico e (b) carta geo-litologica semplificata dell'area di studio.

Fig. 1 - (a) Geographic location and (b) simplified geo-lithological map of the study area.

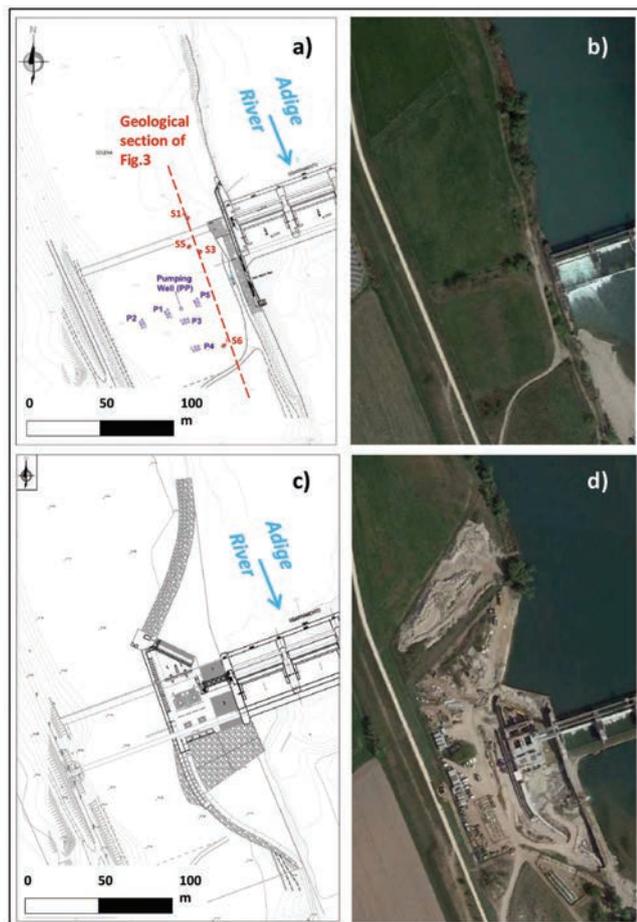


Fig. 2 - Area di studio: (a) Planimetria dello stato di fatto (ante operam) con le fondazioni esistenti e l'ubicazione dei sondaggi geognostici (S1, S3, S5, S6), del pozzo (PP) e dei piezometri di monitoraggio (P1, P2, P3, P4, P5); (b) Vista satellitare prima dei lavori (Google Earth image Landsat/Copernicus 04/11/2015); (c) Planimetria di progetto esecutivo; (d) Vista satellitare durante i lavori di costruzione delle opere (Google Earth image Landsat/Copernicus 04/22/2017).

Fig. 2 - Study area: (a) Ante operam map with existing dam foundations and location of geognostic boreholes (S1, S3, S5, S6), Pumping well (PP) and piezometric monitoring stations (P1, P2, P3, P4, P5); (b) Satellite view of the site before the works (Google Earth image Landsat/Copernicus 04/11/2015); (c) Design map of the new engineering works; (d) Satellite view during the construction works (Google Earth image Landsat/Copernicus 04/22/2017).

Assetto idrogeologico dell'area di studio

L'area di studio si trova nel comune di San Giovanni Lupatoto (VR), nella porzione orientale della media pianura veronese ad una quota di circa 38 m s.l.m., in sponda destra del Fiume Adige, su un tratto di golena ampio circa 100 m, adiacente all'esistente sbarramento idraulico, da cui parte il

canale derivatore che convoglia le acque presso la centrale idroelettrica di Zevio, 7 km a valle (Fig. 1b e Fig. 2).

Il suo assetto geologico è caratterizzato, sia morfologicamente che litologicamente, dall'azione deposizionale ed erosiva del fiume Adige (Sorbini et al. 1984). Le unità litologico-geomorfologiche, rappresentate nell'estratto di carta geolitologica in Fig. 1b, sono: 1) conoide terrazzata dell'Adige; 2) piana di divagazione dell'Adige: sedimenti prevalentemente sabbiosi (2a), sedimenti prevalentemente limosi (2b); 3) depositi dell'alveo attuale.

Sul sito i depositi alluvionali del fiume Adige sono rappresentati da alternanze di sedimenti granulari sciolti (sabbie e ghiaie) che si estendono verticalmente dal piano campagna sino a profondità di circa 120-130 m, a cui si rinvengono i primi depositi coesivi (argille) a bassa permeabilità (dato derivato da stratigrafie dell'Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo; ISPRA 2018).

Precedentemente alla caratterizzazione idrodinamica, è stata svolta la caratterizzazione geologico-tecnica del sottosuolo tramite 4 sondaggi geognostici a carotaggio continuo (S1, S3 di profondità 40 m; S5 di profondità 20 m; S6 di profondità 10 m), ubicati in figura 2; i depositi sono stati caratterizzati attraverso analisi granulometriche e geotecniche di laboratorio su campioni di sedimenti prelevati a diverse profondità e prove di permeabilità in situ di tipo Lefranc eseguite a carico costante (A.G.I. 1977; Hvorslev 1951) a diverse profondità sui sondaggi geognostici (Fig. 3).

L'analisi dei fusi granulometrici ottenuti dalle prove granulometriche ha evidenziato una netta differenziazione tra i depositi ghiaiosi/ghiaiosi-sabbiosi e i depositi francamente sabbiosi a granulometria medio-fine, come si può osservare dai grafici di figura 4 e dai parametri di Tabella 1.

Pertanto, nei primi 40 metri investigati dalle indagini geognostiche il modello geologico concettuale ha individuato 4 unità rappresentate nella sezione geologica di figura 3:

- Ghiaie sabbiose fino a 8-12 m, denominata "Ghiaie superiori";
- Sabbie medie e medio-fini da 8-12 a 27-28 m, denominata "Sabbie";
- Ghiaie sabbiose da 27-28 m a 37-38 m, denominata "Ghiaie inferiori";
- Sabbie oltre i 37-38 m, denominata "Sabbie inferiori".

Le prove Lefranc eseguite a carico costante hanno evidenziato conducibilità idrauliche (K) medio-elevate, con valori compresi nel range $2 \cdot 10^{-5} \div 2 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Tab. 1 - Composizione granulometrica delle unità geologiche definite: valori percentuali medi per ciascuna unità.

Tab. 1 - Granulometric composition of the defined geological units: average percentage values for each unit.

Geological unit	Graph of Fig. 4	%			
		Gravel 60 ÷ 2 mm	Sand 2 ÷ 0.06 mm	Silt 0.06 ÷ 0.002 mm	Clay < 0.002 mm
Upper gravels	a)	63,0	31,1	5,9	0,0
Sands	b)	0,3	90,3	9,4	0,1
Lower gravels	c)	56,1	34,1	9,7	0,1
Lower sands	d)	13,2	84,5	2,4	0,1

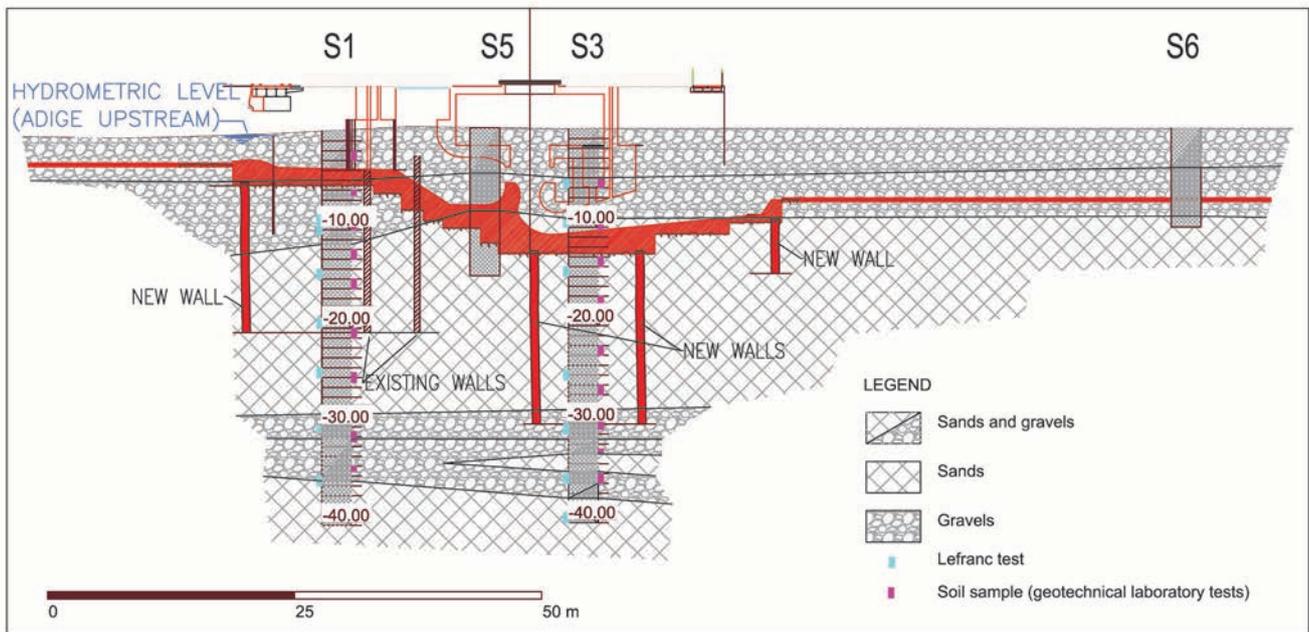


Fig. 3 - Sezione geologico-stratigrafica del sito (traccia in Fig. 2): in rosso sono disegnate le opere fondali ed i diaframmi dell'impianto in progetto. Scala orizzontale / verticale 1:1.

Fig. 3 - Geological section of the site (outline in Fig. 2): in red color foundation works and walls of the new hydroelectric power plant. Horizontal / vertical scale 1:1.

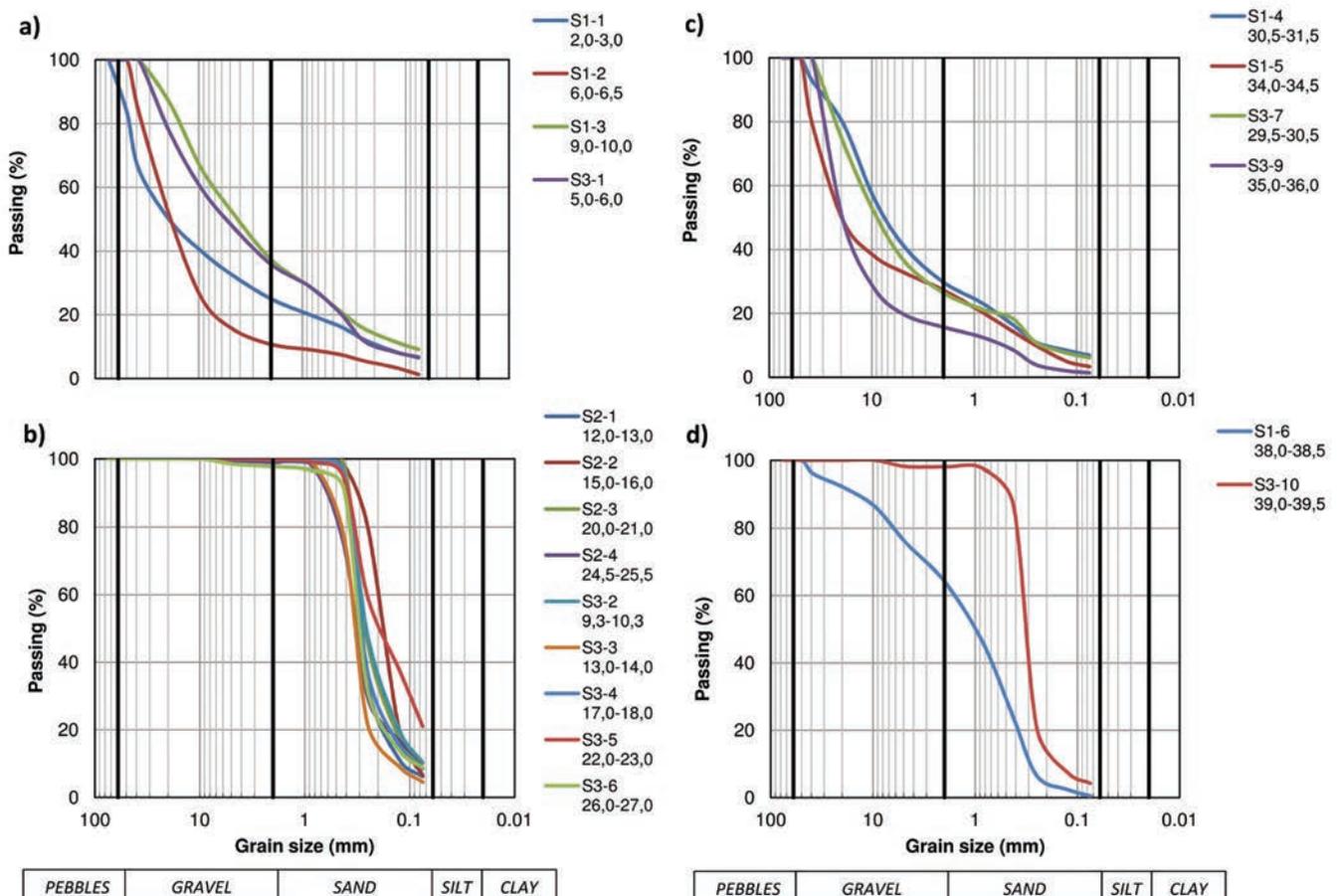


Fig. 4 - Curve granulometriche raggruppate secondo le unità geologiche identificate: (a) "Ghiaie superiori"; (b) "Sabbie"; (c) "Ghiaie inferiori"; (d) "Sabbie inferiori".

Fig. 4 - Grain size distributions grouped according to the identified geological units: (a) "Upper gravels"; (b) "Sands"; (c) "Lower gravels"; (d) "Lower sands".

I suddetti depositi granulari costituiscono quindi un acquifero libero di spessore rilevante (> 100 m) a conducibilità idraulica medio-alta, che contiene una falda idrica con soggiacenza sul sito attorno ai 3.5 m da p.c. (misurata presso i sondaggi S1 e S3 attrezzati a piezometro), corrispondente ad un carico piezometrico pari a circa 34.5 m s.l.m..

Il Fiume Adige rappresenta un'importante condizione al contorno per l'acquifero. Le geometrie indicano che in condizioni naturali esso avrebbe un ruolo prevalentemente drenante, con possibili inversioni stagionali e/o occasionali dello scambio fiume-falda (ad esempio in concomitanza di importanti eventi di piena). Nel sito di studio però, come si potrà meglio evincere dai risultati del monitoraggio eseguito, la presenza dello sbarramento altera il regime naturale dello scambio fiume-falda, in quanto l'elevato battente idrico a monte della traversa (quota di regolazione 37 m s.l.m.) induce un locale comportamento alimentante del fiume; al contrario, il ridotto battente idrometrico a valle della traversa (quota in magra circa 32.4 m s.l.m.) induce un accentuato comportamento drenante. Nei pressi dello sbarramento, sia le direzioni che le velocità di flusso idrico sotterraneo sono alterate dalla regimazione artificiale del fiume e dalla contestuale presenza di diaframmi sotterranei di fondazione di significativa profondità (fino a 20 m per i diaframmi trasversali al fiume ed alla gola), costruiti a protezione dell'opera.

Materiali e metodi

Indagini di caratterizzazione

Al fine di determinare i parametri idrodinamici conducibilità idraulica (K) e porosità efficace (n_e) delle prime tre unità litologiche individuate dal modello geologico concettuale, è

stata appositamente progettata una prova di emungimento, tenendo in considerazione il tipo di acquifero, le peculiari condizioni al contorno (il fiume rappresentava un limite a potenziale imposto, con diversi livelli idrometrici a monte e valle dello sbarramento) e la presenza di moti di filtrazione verticali dovuti alla presenza dei diaframmi sotterranei esistenti. Questi aspetti hanno condizionato anche la scelta della metodologia interpretativa, richiedendo la calibrazione della prova tramite modellazione numerica tridimensionale del flusso allo stato transitorio. Si è optato quindi per una prova di pompaggio di lunga durata con emungimento da pozzo e monitoraggio dei carichi piezometrici su 15 piezometri ubicati presso P1-P5 (Fig. 2).

Il pozzo di emungimento (PP) è stato ubicato al di fuori dell'impronta dei futuri scavi, nonché sufficientemente lontano dai diaframmi esistenti (Fig. 2, Fig. 5). Progettato in conformità alle norme UNI (2015), è stato realizzato con le seguenti caratteristiche tecniche: perforazione a rotoperussione con diametro 620 mm, profondità 39 m da p.c., colonna pozzo in acciaio grezzo al carbonio di diametro 273 mm (tratto cieco fino a 4 m da p.c.; tratto fessurato da 4 a 36 m di profondità da p.c. con filtro a ponte con luce di 1 mm; tratto cieco da 36 m a fondo foro con tappo di fondo); l'intercapedine tra perforo e colonna pozzo è stata riempita con ghiaietto siliceo diametro 1.0-1.5 mm; sviluppo con la tecnica del pistonaggio. Per la prova di emungimento è stata installata un'elettropompa sommersa ROVATTI (22 kW, 70 m prevalenza, 53.3 l/s portata massima).

I piezometri per il monitoraggio dei carichi piezometrici sono stati posizionati a diverse distanze dall'asse del pozzo ed in diverse direzioni dello spazio, al fine di intercettare

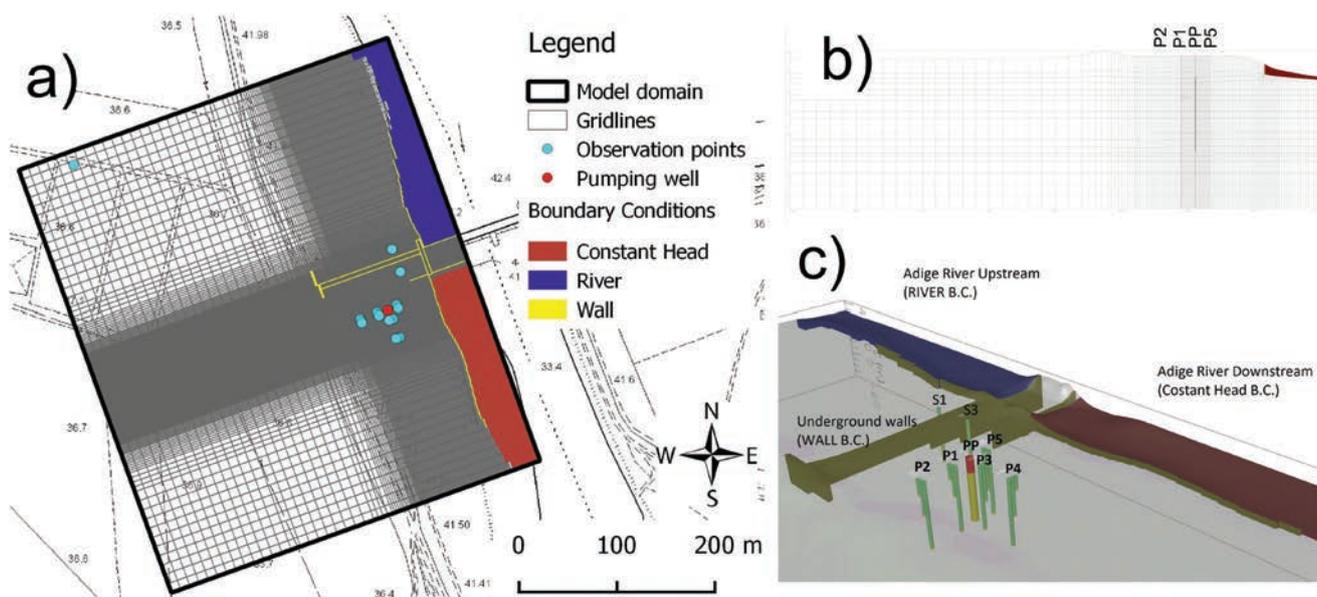


Fig. 5 - (a) Planimetria del dominio di flusso e griglia di discretizzazione orizzontale con posizione pozzo pilota, punti di osservazione dei carichi e condizioni al contorno; (b) discretizzazione verticale su una riga del modello passante per PP (esagerazione verticale 2:1); (c) vista 3D delle condizioni al contorno e punti di osservazione applicati al modello sull'area della prova di emungimento (B.C. Boundary Condition).

Fig. 5 - (a) Planimetric view of the flow domain and horizontal discretization grid with pumping well, observation points and boundary conditions; (b) vertical discretization along a model row passing by PP (vertical exaggeration 2:1); (c) 3D view of boundary conditions and observation points applied to the model in the area of the pumping test (B.C. Boundary Condition).

la geometria asimmetrica del sistema. Per differenziare i parametri idrodinamici delle prime tre unità litologiche, il modello numerico richiedeva il monitoraggio dei carichi su piezometri teoricamente “puntuali”, cioè con tratti filtrati solamente all'interno di ciascuna unità, possibilmente con un tratto filtrato di lunghezza ridotta. A tal fine, presso i punti P1, P2, P3, P4 e P5 indicati nelle planimetrie (Fig. 2, Fig. 5) sono state installate altrettante triplette piezometriche, costituite ciascuna da: 1 piezometro filtrante l'unità “Ghiaie superiori” (denominato “tipo a”); 1 piezometro filtrante l'unità centrale “Sabbie” (denominato “tipo b”); 1 piezometro filtrante l'unità “Ghiaie inferiori” (denominato “tipo c”). La distanza tra i piezometri a, b, c di ciascuna tripla era di circa 2 m; le triplette P1, P3 e P5 erano posizionate a 10 m di distanza radiale dal pozzo; le triplette P2 e P4 a 30 m dal pozzo. Tutti i piezometri erano di tipo Norton e la lunghezza dei tratti filtrati era sempre pari a 3 m.

La prova di emungimento è stata realizzata in due fasi distinte, che costituiscono due prove complementari in sequenza:

A - Prova di pompaggio a gradini di portata o Step Drawdown Test (SDT): prova su pozzo singolo, valida come collaudo tecnico del pozzo e finalizzata a determinare la portata ottimale di emungimento per la successiva prova B; è stata eseguita emungendo dal pozzo diverse portate progressivamente crescenti, nello specifico 4 gradini rispettivamente pari a 9,7, 22, 39,6, 53,0 l/s, mantenuti per 90 minuti cadauno, con stabilizzazione del livello dinamico, e monitorando contestualmente gli abbassamenti piezometrici nel pozzo. La procedura interpretativa di questa prova standard, di comune applicazione, si basa sul rapporto tra le portate e i corrispondenti abbassamenti piezometrici stabilizzati nel pozzo (al termine di ciascun gradino), che permette di ricostruire la “curva caratteristica del pozzo” (Sterrett 2007; Gorla 2010).

B - Prova di pompaggio di lunga durata pozzo-piezometri a portata costante, nota come Constant Rate Test (CRT), eseguita a 40 l/s: è un test di acquifero, in quanto permette di stimare i parametri idrodinamici medi rappresentativi del volume compreso tra il pozzo in pompaggio e uno o più piezometri di monitoraggio. Anche questa prova è di frequente applicazione, ma di più complessa esecuzione ed interpretazione rispetto alla precedente (Sterrett 2007; Gorla 2010). La classica metodologia interpretativa tramite “curve tipo fitting” non era applicabile al caso in esame per la complessità delle condizioni al contorno, i flussi verticali e l'asimmetria del sistema, ragione per cui si è preferita l'interpretazione attraverso la modellazione matematica. Per la misura dei carichi piezometrici sui 15 piezometri e sul Fiume Adige, è stata installata una apposita rete di monitoraggio in continuo che ha misurato e registrato le pressioni idrometriche con frequenza pari a 2 minuti. Il monitoraggio ha interessato un periodo pre-prova di 7 giorni, la fase di emungimento di durata pari a 3 giorni e la fase di risalita monitorata fino a 4 giorni dallo spegnimento del pozzo.

Inoltre, durante la prova CRT è stata eseguita una prova di tracciamento multiplo, sfruttando la configurazione di flusso radiale convergente verso il pozzo, finalizzata a determinare le velocità reali di flusso e quindi ricavare la porosità efficace (Käss 1998; Leibundgut et al. 2011). Per testare le prime 3 unità idrogeologiche sono stati utilizzati contemporaneamente 3 diversi traccianti fluorescenti, ecotossicologicamente innocui (Behrens et al. 2001), oltre che strumentalmente separabili grazie alle diverse lunghezze d'onda di fluorescenza (Benischke et al. 2007; Schudel et al. 2002). Le quantità sono state dimensionate allo scopo di ottenere concentrazioni in uscita inferiori al limite di visibilità ad occhio nudo ma strumentalmente rilevabili da un fluorimetro da campo (Schnegg 2002). I traccianti, previamente diluiti in soluzione acquosa, sono stati immessi per gravità nella tripla di piezometri P3 (Fig. 2, Fig. 5), sfruttando le buone permeabilità dell'acquifero:

- 30 gr di Sulforhodamina-G (formula chimica $C_{25}H_{25}N_2NaO_7S_2$, CAS n. 61332-27-2), diluiti all'interno di 1 litro d'acqua, nelle “Ghiaie superiori” (piezometro P3a);
- 15 gr di Fluoresceina Sodica (formula chimica $C_{20}H_{10}O_5Na_2$, CAS n. 518-47-8), diluiti in 0,5 litri d'acqua, nelle “Sabbie” (piezometro P3b);
- 200 gr di Amino-G-Acid (formula chimica $C_{10}H_8NO_6S_2Na$, CAS n. 86-65-7), diluiti in 2 litri d'acqua, nelle “Ghiaie inferiori” (piezometro P3c).

Modellazione numerica di flusso

Per la modellazione numerica del flusso si è utilizzato il codice alle differenze finite MODFLOW-2005, sviluppato dall' U.S. Geological Survey (Harbaugh 2005; McDonald and Harbaugh 1988). È stato implementato un dominio di dimensione orizzontale 400 m (asse X) per 460 m (asse Y), con griglia di flusso ruotata di $-19,8^\circ$ rispetto al Nord, orientata con asse Y parallelo alla sponda del Fiume Adige. La discretizzazione della griglia sul piano XY ha generato celle di ampiezza variabile da 0,5 x 0,5 m nella zona centrata sul Pozzo Pilota, a 1 x 1 m su tutto il campo prova, poi progressivamente crescente fino a 10 x 10 m sui margini del dominio (Fig. 5a).

Il dominio, con estensione verticale di 58 m, da 38 a -20 m s.l.m., è stato discretizzato in 18 layers di spessore variabile (Fig. 5b), con superfici di separazione generate interpolando i dati delle indagini geognostiche disponibili: i 4 sondaggi geognostici preliminari (S1, S3, S5, S6), le 5 triplette piezometriche P1-P5 ed il pozzo pilota PP (ubicati in Fig. 2). La discretizzazione verticale del modello è risultata complessa, in quanto doveva permettere la differenziazione geometrica di diversi elementi: le 4 unità idrogeologiche individuate, le opere sotterranee di sbarramento del flusso (diaframmi e palancole), il tratto filtrato del pozzo, i tratti fessurati dei piezometri di monitoraggio. Inoltre era necessario differenziare un numero di layers sufficiente a calcolare con buona approssimazione i flussi verticali, che tuttavia non generasse tempi computazionali troppo lunghi.

Le condizioni al contorno applicate al dominio di modellazione sono state:

- Fiume Adige a monte dello sbarramento (Fig. 5): fiume alimentante la falda per filtrazione attraverso uno strato di sedimenti di subalveo a permeabilità inferiore a quella dell'acquifero, simulato con Condizione di flusso dipendente dal carico (3° tipo), RIVER package di MODFLOW applicata sul Layer 1 a tutte le celle rappresentanti il fiume compreso nel dominio; il parametro Conduttanza è stato calcolato dal software assegnando valori plausibili di spessore medio (2 m) e conducibilità idraulica (10^{-5} m/s) dei sedimenti di subalveo e verificando i risultati in fase di calibrazione;
- Fiume Adige a valle dello sbarramento (Fig. 5): fiume drenante la falda, simulato con Condizione di carico imposto (1° tipo), CONSTANT HEAD di MODFLOW applicata sul Layer 1 a tutte le celle rappresentanti il fiume compreso nel dominio, che simula una connessione diretta tra fiume e acquifero, poiché l'alveo è impostato nella prima unità idrogeologica;
- Entrambe le precedenti condizioni al contorno sono state inserite come carichi variabili in funzione del tempo, utilizzando i dati del monitoraggio idrometrico;
- Limiti Nord, Ovest, Sud: condizione NO FLOW, scambio nullo con l'esterno del dominio.

Le condizioni interne applicate al dominio sono state:

- Pozzo Pilota in emungimento (Fig. 5): condizione di Flusso imposto (2° tipo), simulata con PUMPING WELL package di MODFLOW;
- Diaframmi e altre opere di sbarramento (Fig. 5): le opere con spessori inferiori alla dimensione delle celle sono state simulate utilizzando la funzione WALL di MODFLOW, assegnando lo spessore reale dell'opera ed una K bassissima (10^{-8} m/s) rappresentativa del calcestruzzo; le opere con spessori uguali o superiori alla dimensione delle celle sono state rappresentate con celle inattive (INACTIVE FLOW), ossia flusso di scambio nullo tra l'acquifero e tali celle, con un effetto analogo alla condizione precedente sulle circostanti celle di acquifero.

La simulazione è stata eseguita, in condizioni transitorie, su una finestra temporale complessiva di 6 giorni, centrata sulla prova di emungimento.

La calibrazione, di tipo trial & error (Andersson et al. 2015), è stata incentrata sulla modifica delle conducibilità idrauliche necessarie a riprodurre la distribuzione spazio-temporale dei carichi idraulici. Sono stati inseriti 18 punti di osservazione dei carichi piezometrici: tutti i piezometri delle 5 triplette piezometriche, oltre ai piezometri S1 e S3 e 1 pozzo privato situato ai margini del dominio (Fig. 5a).

Le prime simulazioni sono state utilizzate per valutare l'influenza di diverse caratteristiche di costruzione del modello sulla calibrazione: al fine di contenere i tempi computazionali e contemporaneamente permettere una buona risoluzione spaziale sull'area di prova, le dimensioni del dominio sono state progressivamente ridotte, verificando che le condizioni al contorno fossero sufficientemente lontane; analogamente

si è verificato che la posizione della superficie di bottom del modello non condizionasse la soluzione, partendo da simulazioni con superfici di bottom più profonde.

Risultati

Prove di emungimento

I risultati della prova a gradini (SDT) sono riassunti in Tabella 2, dove vengono mostrati per ogni gradino le portate e gli abbassamenti stabilizzati, oltre alle altre grandezze elaborate secondo la metodologia sopra esposta. L'andamento della prova è rappresentato in figura 6a, dove abbassamenti e portate sono graficati in funzione del tempo. La curva caratteristica del pozzo (Fig. 6b), che confronta l'abbassamento stabilizzato al termine di ciascun gradino con la portata corrispondente, ha un andamento lineare perché la portata massima di emungimento non ha superato la portata critica del pozzo. I risultati hanno confermato un buon comportamento del pozzo, che risulta efficiente e ben sviluppato, con un coefficiente per le perdite di carico quadratiche $C < 2000 \text{ s}^2/\text{m}^5$ (secondo Walton 1963) e un valore di efficienza W.E. $\geq 80 \%$ (secondo Jacob 1946), e hanno dato indicazioni preliminari sugli abbassamenti rilevabili ai piezometri di monitoraggio ubicati alle distanze di 10 m, permettendo così di definire la portata di emungimento per la prova CRT (40 l/s).

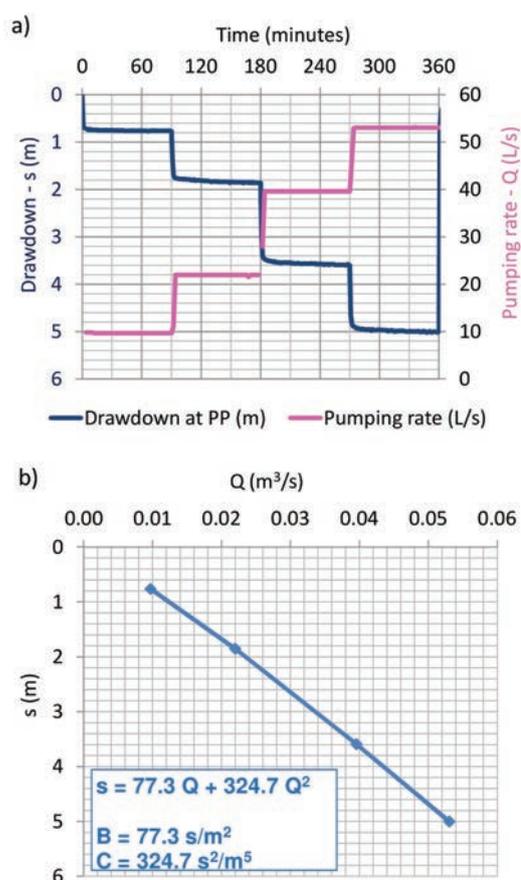


Fig. 6 - Prova a gradini di portata (SDT) sul pozzo di emungimento (PP): (a) abbassamenti e portata in funzione del tempo; (b) curva caratteristica di PP.

Fig. 6 - SDT test on the pumping well (PP): (a) drawdown at PP and pumping rate as a function of time; (b) characteristic curve of PP.

Tab. 2 - Prova a gradini (SDT) sul pozzo di emungimento (PP): Q portata di emungimento, s abbassamento piezometrico nel pozzo, B perdite di carico lineari nel pozzo, C perdite di carico quadratiche nel pozzo, W.E. efficienza del pozzo = $(BQ)/(BQ+CQ^2) \cdot 100$, T.I. indice di turbolenza = $(CQ^2/s) \cdot 100$.

Tab. 2 - SDT test on the pumping well (PP): Q pumping rate, s drawdown in well, B linear head loss in well, C quadratic head loss in well, W.E. Well Efficiency = $(BQ)/(BQ+CQ^2) \cdot 100$, T.I. Turbulence Index = $(CQ^2/s) \cdot 100$.

Step	Q (m ³ /s)	s (m)	s/Q (s/m ²)	Q/s (m ² /s)	B Q (m)	C Q ² (m)	B Q + C Q ² (m)	W.E. (%)	T.I. (%)
1	0.0097	0.76	78.46	0.0127	0.75	0.030	0.779	96.1	4.0
2	0.0220	1.85	84.23	0.0119	1.70	0.157	1.854	91.6	8.5
3	0.0396	3.59	90.70	0.0110	3.06	0.509	3.568	85.7	14.2
4	0.0530	5.00	94.25	0.0106	4.10	0.914	5.014	81.8	18.3

Relativamente alla prova CRT, è opportuno premettere che nelle prime ore del test si è verificato un guasto al generatore elettrico, che ha causato lo spegnimento del pozzo per alcune ore e la risalita dei livelli piezometrici verso le condizioni iniziali (ben evidente nei diagrammi dei carichi piezometrici, come in Fig. 7a). Tale evenienza fortunatamente non ha inficiato i risultati del test. I dati di monitoraggio hanno evidenziato un trend piezometrico molto simile su tutti i piezometri durante le condizioni naturali (in Fig. 7 è mostrato solo il cluster 5, vedi pagina successiva), risultato coerente con la vicinanza planimetrica dei piezometri e col fatto che, seppur filtrando quote diverse, interessano tutti lo stesso sistema acquifero influenzato dalle stesse condizioni al contorno. Appare però evidente una differenziazione delle curve nelle fasi transitorie di discesa e risalita del livello piezometrico (dovute rispettivamente all'accensione del pozzo ed allo spegnimento): si distinguono due diverse pendenze, una più dolce per i piezometri "tipo a" filtrati nella prima unità (ghiaie superiori) all'interno delle quali oscilla la tavola d'acqua, ed una più ripida per i piezometri "tipo b" e "tipo c" filtrati nelle unità sottostanti, che presentano sempre condizioni di acquifero confinato (Fig. 7a).

Molto interessante risulta il confronto con i livelli idrometrici del Fiume Adige a monte e a valle dello sbarramento; appare subito evidente che è il regime idrometrico del Fiume Adige a valle dello sbarramento ad influenzare maggiormente i livelli piezometrici misurati sul campo prova; l'andamento di tali livelli è piuttosto stabile in quanto regimato dallo sbarramento stesso, ma presenta alcuni picchi (di circa 20-30 cm) dovuti a manovre di apertura e chiusura delle paratoie, che, generando repentine variazioni del livello del fiume a valle dello sbarramento, a loro volta causano una rapida risposta nei piezometri di monitoraggio, come si può osservare dai grafici di Fig. 7a e Fig. 7b.

Nelle condizioni naturali si osserva poi un aumento del carico piezometrico procedendo dagli strati superficiali agli strati più profondi: i piezometri di "tipo c", posizionati nelle ghiaie inferiori, hanno sempre il carico piezometrico maggiore, seguiti da quelli di "tipo b" (sabbie) ed infine da quelli di "tipo a" (ghiaie superiori). I piezometri di "tipo b" a volte sono ben separati dagli altri due tipi (come in P1 e P4), a volte sono molto vicini ai piezometri di "tipo c" (come in P3 e P5; Fig. 7a), mentre in P2 sono molto prossimi al "tipo a". Fatte salve queste differenze, imputabili sia alla diversa profondità del tratto filtrato, sia alla diversa posizione planimetrica

rispetto alla sponda del Fiume Adige ed eventualmente a locali eterogeneità dell'acquifero, l'aspetto più interessante è la presenza di un gradiente piezometrico verticale molto chiaro, generato dallo sbarramento idraulico sul fiume e dalle sue fondazioni profonde (diaframmi trasversali alla gola, posizionati a monte del campo prova) che generano un flusso verticale ascendente nella porzione di sottosuolo ubicata più a valle (Fig. 7, Fig. 11).

Prova di tracciamento

L'interruzione temporanea dell'alimentazione elettrica dell'elettropompa ha parzialmente pregiudicato i risultati della prova di tracciamento, per due motivi: durante l'interruzione del pompaggio il trasporto dei traccianti è stato governato da un campo di moto transitorio simile a quello delle condizioni naturali, con direzione opposta rispetto al modello teorico a flusso radiale convergente; l'interruzione elettrica ha interrotto anche l'acquisizione dati al fluorimetro da campo.

In figura 8 sono presentate le curve di arrivo dei traccianti, come concentrazioni (ppb) in funzione del tempo. La curva di arrivo dell'Uranina immessa nell'unità idrogeologica "Sabbie" è stata recuperata integralmente, e mostra un arrivo del tracciante ben ritardato rispetto all'Amino-G-Acid immessa nell'unità "Ghiaie inferiori"; di quest'ultima è stata rilevata solo la coda a causa della temporanea interruzione delle letture. Il tracciante Sulforhodamina-G non è mai stato recuperato al pozzo.

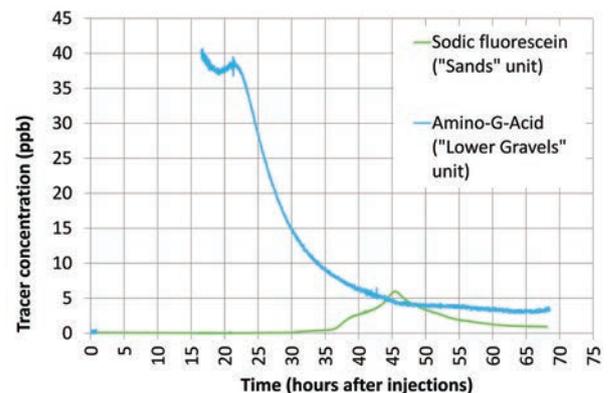


Fig. 8 - Prova di tracciamento multiplo accoppiata alla prova CRT: curve di arrivo rilevate dal fluorimetro da campo.

Fig. 8 - Multiple tracer test coupled with CRT test: breakthrough curves detected by the field fluorimeter.

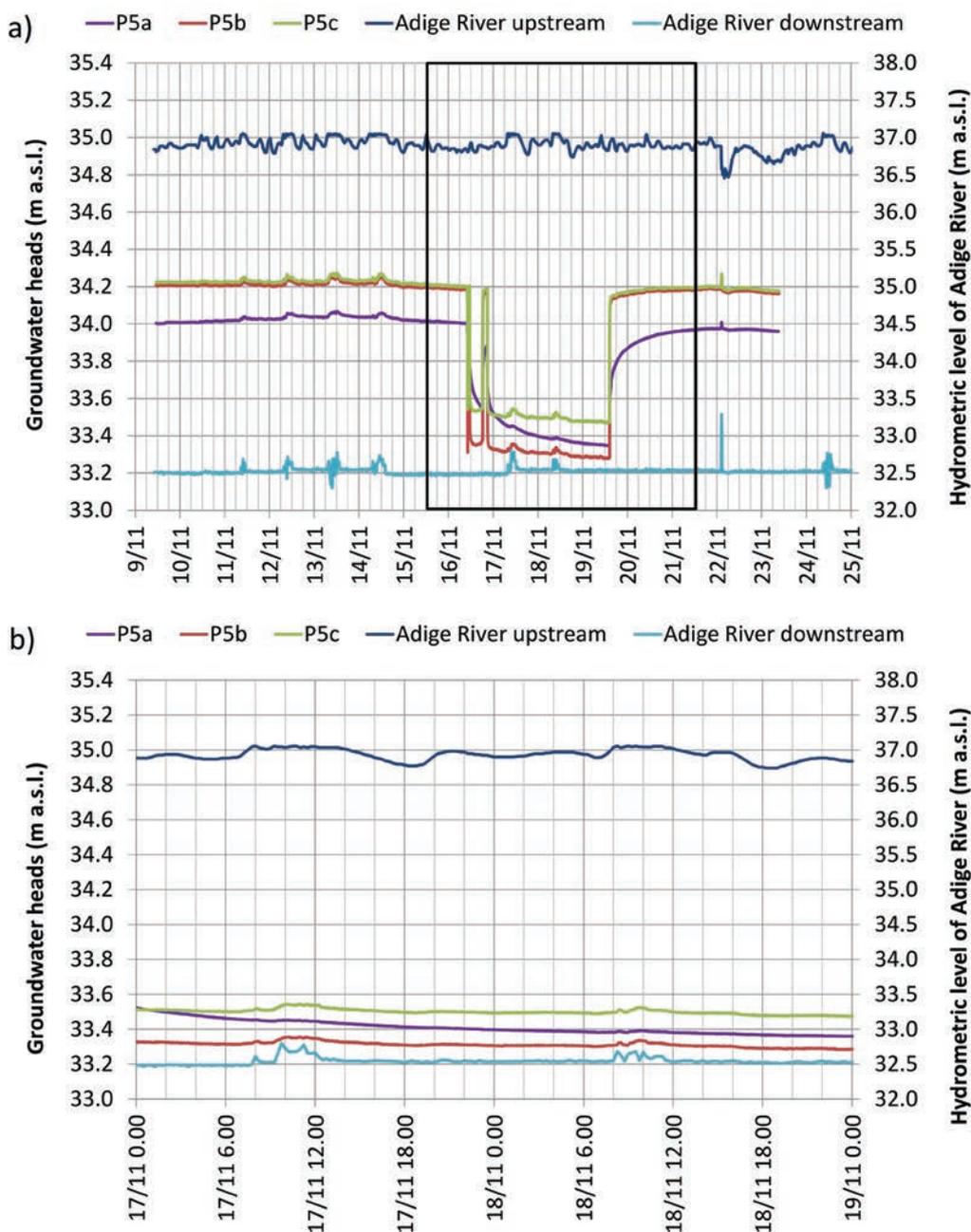


Fig. 7 - Prova CRT: confronto tra i carichi piezometrici alla tripletta di piezometri P5 e il livello idrometrico del Fiume Adige (monte e valle sbarramento): (a) serie dati completa, il riquadro nero indica l'intervallo temporale della simulazione di calibrazione; (b) particolare dell'intervallo dal 17 al 19 novembre.

Fig. 7 - CRT test: comparison between groundwater heads at the three P5 piezometers and hydrometric level of the Adige River (upstream and downstream of the dam): (a) complete data set, the black square points out the time window of the simulation used for model calibration; (b) detail on data set between November 17th and 19th.

Calibrazione del modello

Al termine della fase di calibrazione delle condizioni al contorno, il modello è stato utilizzato per la stima dei parametri idrodinamici, testando diverse distribuzioni del coefficiente di permeabilità K .

La calibrazione qualitativa si è basata sull'analisi degli andamenti dei carichi piezometrici in funzione del tempo ai punti di osservazione, confrontandoli con quelli calcolati dal modello. In Fig. 9 sono mostrati a titolo d'esempio i risultati alle triplette P2 e P1. Principalmente si sono presi in considerazione:

- gli abbassamenti stabilizzati rilevati ai piezometri nella fase di emungimento essendo questi sicuramente i parametri più sensibili alla K di ciascuna unità. Sui piezometri dove permane uno scarto apprezzabile (> 0.1 m) tra calcolati e osservati nella fase delle condizioni pre e post pompaggio, si è cercato comunque di calibrare gli abbassamenti stabilizzati, mantenendo di conseguenza questo scarto anche sui livelli dinamici;
- le pendenze delle curve di discesa e risalita rilevate ai piezometri rispettivamente a seguito dell'accensione e dello spegnimento del pozzo che, oltre alla K ed alla

condizione al contorno del fiume, sono influenzate dai parametri di immagazzinamento di ciascuna unità.

La calibrazione quantitativa si è basata sull'elaborazione statistica dei residui (R_i , in m), determinati come differenza tra il valore calcolato (X_{cal}) ed il valore osservato (X_{obs}). Il livello di calibrazione quantitativa è stato valutato in base allo scarto quadratico medio normalizzato (nRMS, in %) definito come lo scarto quadratico medio (RMS, in m) diviso per la massima differenza tra i valori di carico osservati. Analizzando congiuntamente tutti i risultati, e tenendo in considerazione la complessità del sistema idrogeologico modellato, si ritiene di aver raggiunto un discreto livello di calibrazione, riassunto dai seguenti parametri statistici: RMS normalizzato pari a 5.5 %; media assoluta dei residui pari a 0.10 m; coefficiente di correlazione lineare di 0.973; discrepanze percentuali sul bilancio di massa del flusso comprese tra 0.03 e -0.1 %; istogramma dei residui che approssima abbastanza bene la distribuzione gaussiana (Fig. 10).

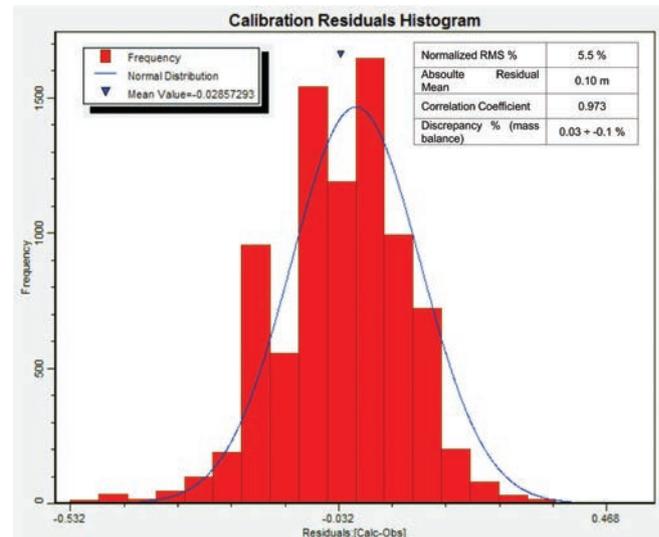


Fig. 10 - Calibrazione quantitativa del modello: istogramma dei residui e tabella dei principali parametri statistici di calibrazione.

Fig. 10 - Quantitative calibration of the model: histogram of the residuals and table with main statistical parameters of calibration.

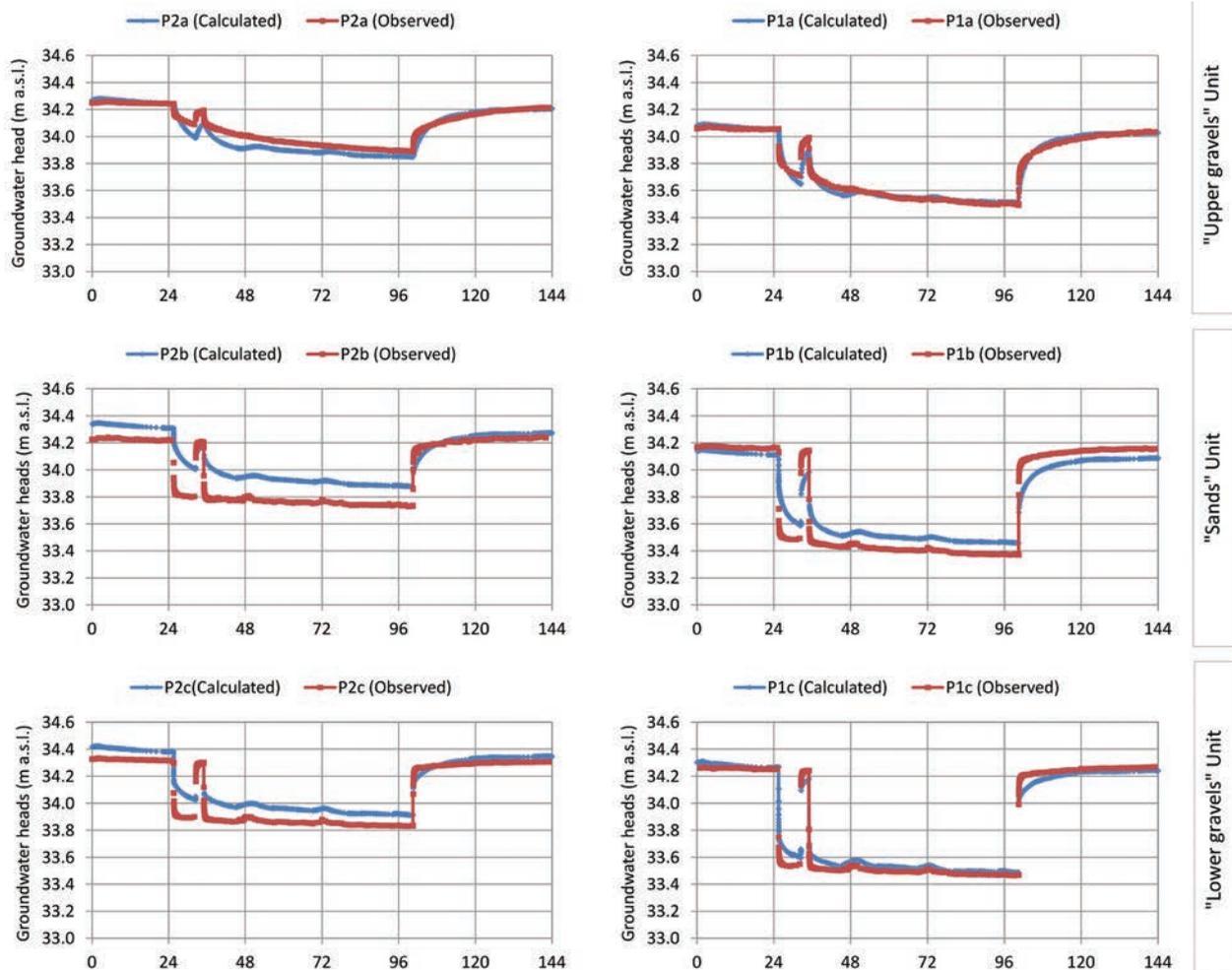


Fig. 9 - Grafici di confronto tra carichi piezometrici osservati nel monitoraggio e calcolati dal modello, in funzione del tempo (asse x, tempo in ore da inizio modello): piezometri delle triplette P2 e P1.

Fig. 9 - Comparison graphs between groundwater heads observed with monitoring and groundwater heads calculated by the model, as a function of time (x axis is time in hrs from the beginning of the model simulation): piezometers of stations P2 and P1.

Nelle immagini di figura 11 sono mostrati alcuni output grafici dei risultati del modello calcolati al tempo $t = 60.3$ ore da inizio simulazione (con pozzo PP in emungimento), che permettono di apprezzare tridimensionalmente il campo di moto determinato dalle condizioni al contorno applicate.

Calibrazione della prova di tracciamento

È stato utilizzato il codice MODPATH (Pollock 1994) per simulare il trasporto advettivo di particelle conservative (che si muovono alla stessa velocità dell'acqua) inserite nel modello tridimensionale all'altezza dei tratti filtrati dei piezometri utilizzati per le immissioni dei traccianti ed analizzarne i tempi di transito dai piezometri al pozzo. Tale codice utilizza essenzialmente la distribuzione dei carichi piezometrici calcolata dal modello di flusso (output di MODFLOW-2005) ed il parametro porosità efficace (n_e). La calibrazione è frutto di successive simulazioni con diversi valori di n_e fino a raggiungere tempi di transito confrontabili con quelli osservati sul campo.

La simulazione spiega il mancato recupero del tracciante immesso nelle ghiaie superficiali (Sulforhodamina-G,

piezometro P3a): a causa dello spegnimento del pozzo, il tracciante ha deviato verso il Fiume Adige a valle dello sbarramento e poi alla riaccensione non è stato ricatturato dall'emungimento perché già esterno al cono di depressione piezometrica e quindi ha continuato il suo percorso verso il fiume.

Dalla simulazione della prova di tracciamento si sono ottenuti i seguenti risultati:

- Sabbie: la calibrazione del picco di Fluoresceina sodica restituisce un valore di porosità efficace dell'8%, valore compatibile sia con la composizione granulometrica (la presenza di limi, anche se in debole percentuale, può ridurre significativamente la porosità efficace di un deposito granulare), che con la conducibilità idraulica media determinata per questa unità;
- Ghiaie inferiori: la mancata rilevazione del picco di tracciante Amino-G-Acid permette solamente una ipotesi del tempo di transito dello stesso e quindi la stima di un range di porosità efficaci per questa unità, che risultano comprese tra il 7% e il 10%. Si ritiene che questi valori siano compatibili con la composizione granulometrica di

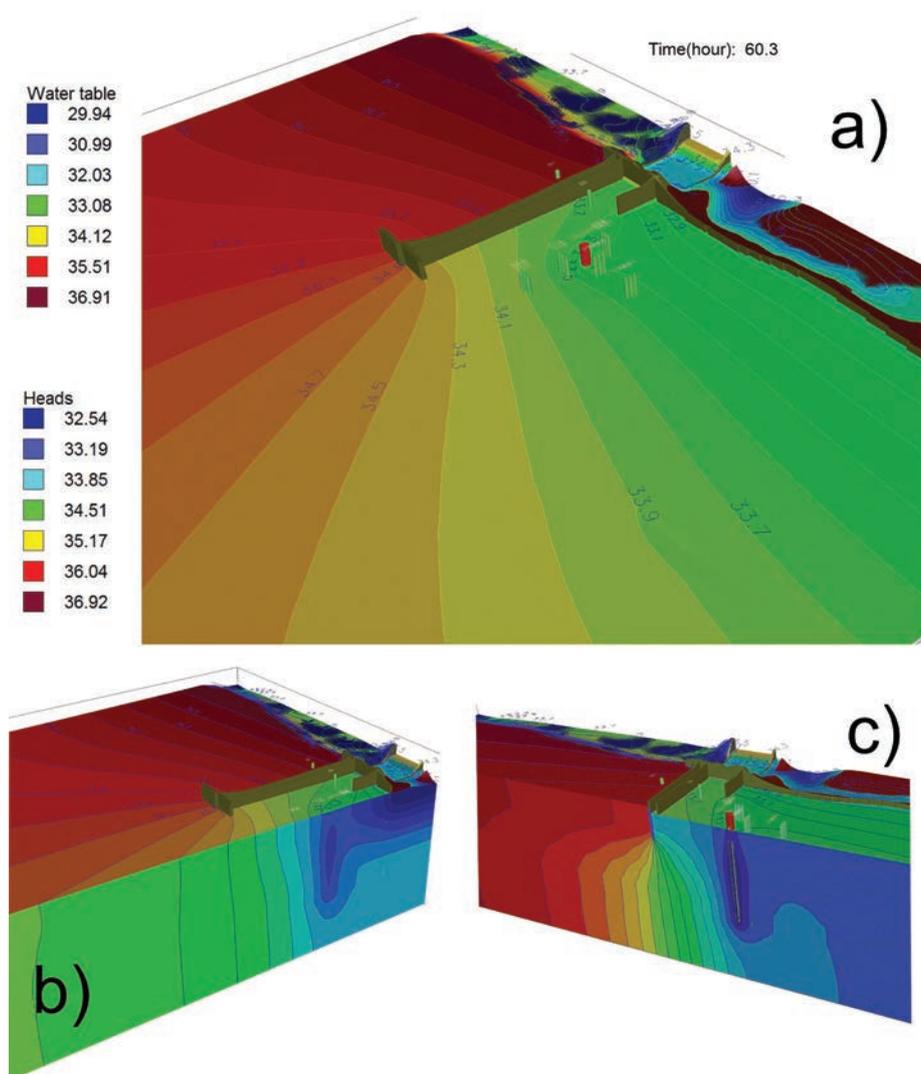


Fig. 11 - Piezometria calcolata dal modello al tempo $t=60.3$ ore da inizio simulazione: (a) tavola d'acqua; (b) vista lungo una sezione perpendicolare al Fiume Adige; (c) vista lungo una sezione parallela al Fiume Adige.

Fig. 11 - Groundwater heads calculated by the model at time $t=60.3$ hrs from the simulation start: (a) water table; (b) view along a section perpendicular to Adige River; (c) view along a section parallel to Adige River.

questi depositi ad elevata eterogeneità, con il loro stato di addensamento dovuto alla posizione profonda e con il valore di conducibilità idraulica media;

- Per l'unità delle Ghiaie superiori non si sono ottenuti risultati sperimentali, ma si può ipotizzare una porosità efficace prossima al valore di *Specific yield* (S_y) determinato dalla calibrazione del flusso, quindi $\leq 15\%$.

Stima dei parametri idrogeologici

Sulla base delle elaborazioni descritte, la configurazione di parametri che ha restituito la migliore calibrazione è quella presentata in Tabella 3. Le conducibilità idrauliche determinate, assunte isotrope per tutti i layers del modello, risultano coerenti con la composizione granulometrica dei sedimenti costituenti tali unità, e si distribuiscono su 3 diversi ordini di grandezza: 10^{-3} m/s per la Ghiaie superiori, 10^{-5} m/s per le Sabbie e 10^{-4} m/s per la Ghiaie inferiori.

Il parametro S_s (*Specific Storage*) ha un'influenza minore sui risultati di calibrazione, e risulta compreso nel range $10^{-5} \div 10^{-6}$ m^{-1} . Il parametro S_y (*Specific yield*) è stato determinato

solo per il Layer 1 (l'unico layer parzialmente saturo), e si considera rappresentativo di tutta la prima unità idrogeologica (Ghiaie superiori). Per le unità litologiche delle sabbie e ghiaie inferiori, la calibrazione con MODPATH dei tempi medi di transito ottenuti dalle prove di tracciamento eseguite ha permesso la stima delle porosità efficaci (n_e).

È interessante il confronto tra tutti i valori di K disponibili per il sito, rappresentato nel grafico di figura 12, dove oltre ai valori ottenuti dalla calibrazione del modello, sono riportati i valori minimi (min) e massimi (max) dei range di K calcolati applicando diverse metodologie: prove Lefranc all'interno dei fori di sondaggio S1 e S3, ubicate sul profilo di figura 3; calcolo della K con la formula di Hazen (Hazen 1892) a partire dalle curve granulometriche dei campioni di terreno prelevati sugli stessi sondaggi; metodologie varie per i dati storici disponibili in Veder (1959). Si noti come le prove Lefranc a carico costante eseguite sul sito riducano la differenziazione tra le diverse unità, mentre tutti gli altri metodi evidenzino generalmente una K superiore per le unità costituite da ghiaie e ghiaie sabbiose.

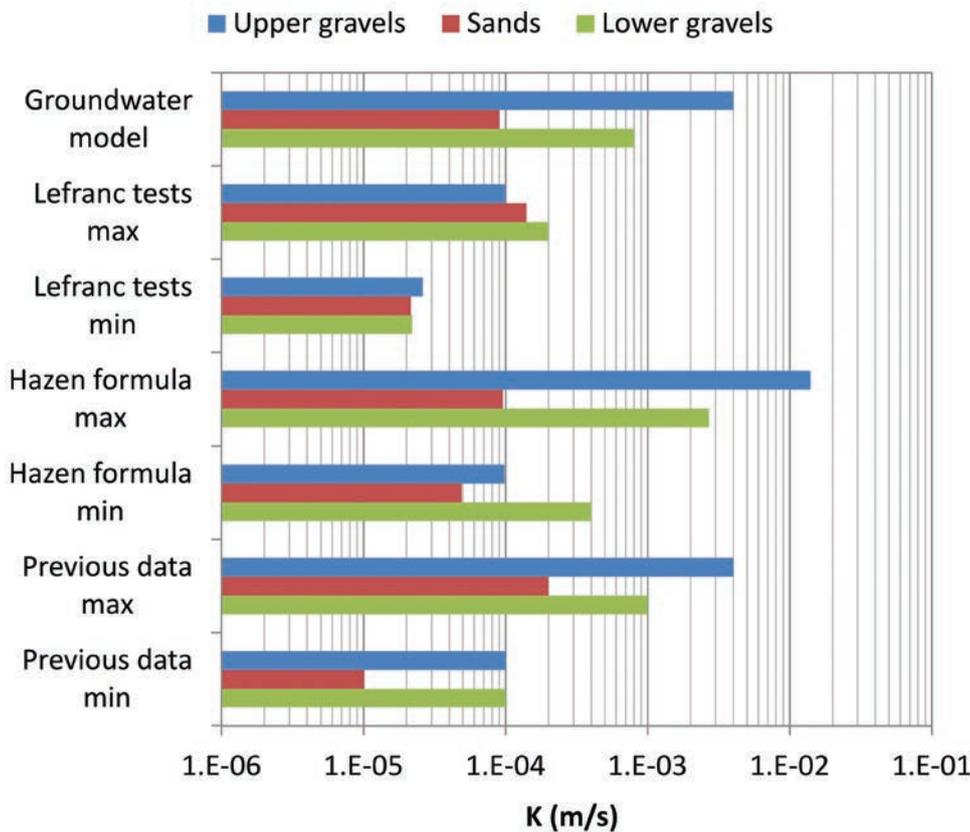


Fig. 12 - Confronto tra tutti i dati disponibili di K per le 3 unità idrogeologiche, derivanti da diversi metodi.

Fig. 12 - Comparison between all the available K data of the 3 Hydrogeological Units, derived from different methods.

Tab. 3 - Risultati della calibrazione: stima dei parametri per le 4 Unità Idrogeologiche definite nel modello concettuale.

Tab. 3 - Calibration results: parameter estimation for the 4 Hydrogeologic Units defined in the conceptual model.

K zone	Hydrogeologic Unit	Layers of the model	K (m/s)	S_s (m^{-1})	S_y (-)	n_e (-)
1	"Upper gravels"	L1 ÷ L3	$4 \cdot 10^{-3}$	$10^{-5} \div 10^{-6}$	0.15	≤ 0.15
2	"Sands"	L4 ÷ L9	$8 \cdot 10^{-5}$	$10^{-5} \div 10^{-6}$	n.d.	0.08
3	"Lower gravels"	L10 ÷ L12	$8 \cdot 10^{-4}$	$10^{-5} \div 10^{-6}$	n.d.	$0.07 \div 0.10$
4	"Lower sands"	L13 ÷ L18	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Percorsi e velocità di flusso: confronto tra ante e post operam

Come accennato nell'introduzione, le opere in progetto avrebbero comportato modifiche sostanziali alle fondazioni profonde, ubicate a quote tali da causare significativi cambiamenti alla rete di filtrazione delle acque sotterranee rispetto alla situazione ante operam (Fig. 2).

In particolare, le modifiche più rilevanti, rappresentate in figura 13, sono:

1. fondazioni della pila sulla spalla destra dello sbarramento: da condizioni di non-barriera costituita da pali distanziati 1.5 m, a condizione di barriera idraulica determinata da una nuova paratia in colonne compenstrate in Jet Grouting lungo tutta l'estensione della spalla destra;
2. nuovo diaframma continuo in pali compenestrati (condizione di barriera idraulica) che dalla spalla destra dello sbarramento si prolunga alla nuova sponda del fiume con una profondità fino a 22 m s.l.m. e prosegue entro la gola per ulteriori 20 metri fino a quota +29.2 m s.l.m.;
3. realizzazione del blocco della centrale in cemento armato (comportamento impermeabile) che in questo settore approfondisce di 5 m l'esistente diaframma golenale;
4. nuovo diaframma continuo in pali compenestrati spinto fino alla quota di 21.2 m s.l.m. lungo tutta la nuova sponda destra.

Per valutare l'effetto delle nuove opere sui percorsi e sulle velocità di filtrazione delle acque sotterranee, sono state implementate apposite simulazioni previsionali a partire dal modello di flusso calibrato, inserendo le nuove opere nella geometria tridimensionale del dominio di flusso (Fig. 13). In via cautelativa sono state assunte le condizioni più sfavorevoli, ossia quote del fiume Adige pari a 37.0 m s.l.m. a monte e 32.5 m s.l.m. a valle dello sbarramento, poiché è nelle condizioni di bassa portata che si genera il massimo differenziale monte-valle e quindi le velocità di filtrazione

risultano più elevate (al contrario, in condizioni di massima piena, a causa dell'apertura delle paratoie, il differenziale di quota monte-valle è di soli $0.8 \div 1.0$ m).

Utilizzando la funzione *Particle Tracking* del codice MODPATH sono state calcolate alcune linee di flusso, al fine di valutare i tempi di transito delle particelle e le velocità di filtrazione all'interno del mezzo poroso.

Le linee di flusso calcolate nelle condizioni di ante operam e classificate secondo il tempo totale di transito sono mostrate in Fig. 14a: si può notare il veloce transito dei flussi sotterranei che sfruttano il passaggio attraverso le fondazioni su pali della pila destra dello sbarramento con tempi di transito totali variabili da un minimo di 28 ore ad un massimo di 541 ore, corrispondenti rispettivamente a 1.1 e 22.5 giorni. In figura 14b sono mostrate invece le velocità di transito (velocità reali di filtrazione nel mezzo poroso) discretizzate su segmenti di lunghezza variabile corrispondenti a tempi di transito fissi e pari a 12 ore. Ne risultano velocità comprese tra 0.2 e 82.3 m/giorno.

I risultati nelle condizioni post operam sono rappresentati in maniera analoga. In Fig. 14c le linee di flusso sono classificate secondo il tempo di transito totale, necessario a compiere l'intero percorso tra Adige monte e Adige valle sbarramento. Le diverse linee di flusso presentano tempi di transito totali variabili da un minimo di 235 ore ad un massimo di 1556 ore, corrispondenti rispettivamente a 9.8 e 64.8 giorni. In figura 14d sono illustrate graficamente le velocità di transito discretizzate su segmenti di lunghezza variabile corrispondenti a tempi di transito pari a 24 ore. Ne risultano velocità comprese tra 0.1 e 46.1 m/giorno.

Risulta evidente come la costruzione delle nuove opere determini un sensibile aumento dei tempi totali di transito e, contestualmente, una riduzione delle velocità di filtrazione e, soprattutto, un posizionamento delle zone a maggiore velocità in aree più lontane dalle fondazioni dello sbarramento.

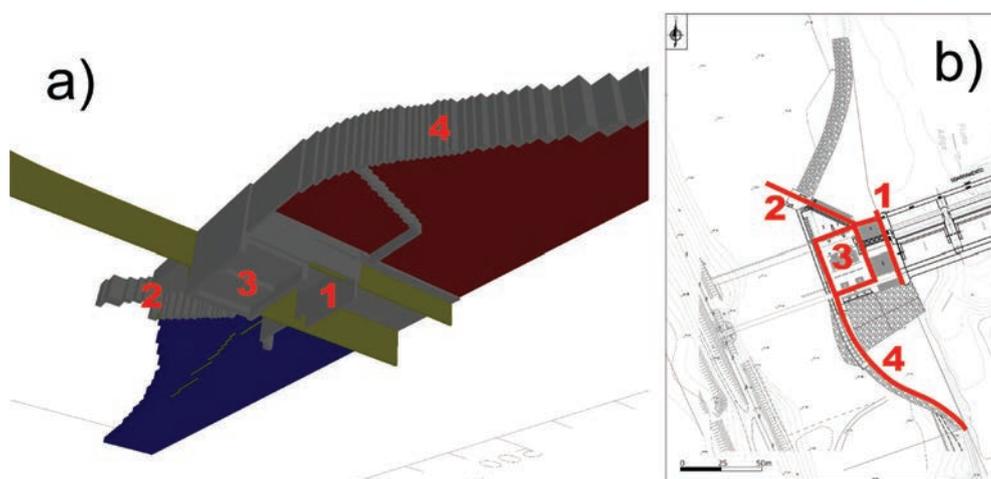


Fig. 13 - Condizioni al contorno e condizioni interne applicate al dominio di flusso: (a) vista 3D con inquadratura dal basso: in verde le barriere impermeabili pre-esistenti, in grigio le nuove barriere impermeabili, in blu la condizione RIVER e in rosso la condizione Constant Head; (b) identificazione delle nuove barriere impermeabili illustrate nel testo.

Fig. 13 - Boundary conditions and internal conditions applied to flow domain: (a) 3D view seen from below: in green the old impermeable barriers, in grey the new ones, in blue the RIVER b.c. and in red the Constant Head b.c.; (b) identification of the new impermeable barriers explained in the main text.

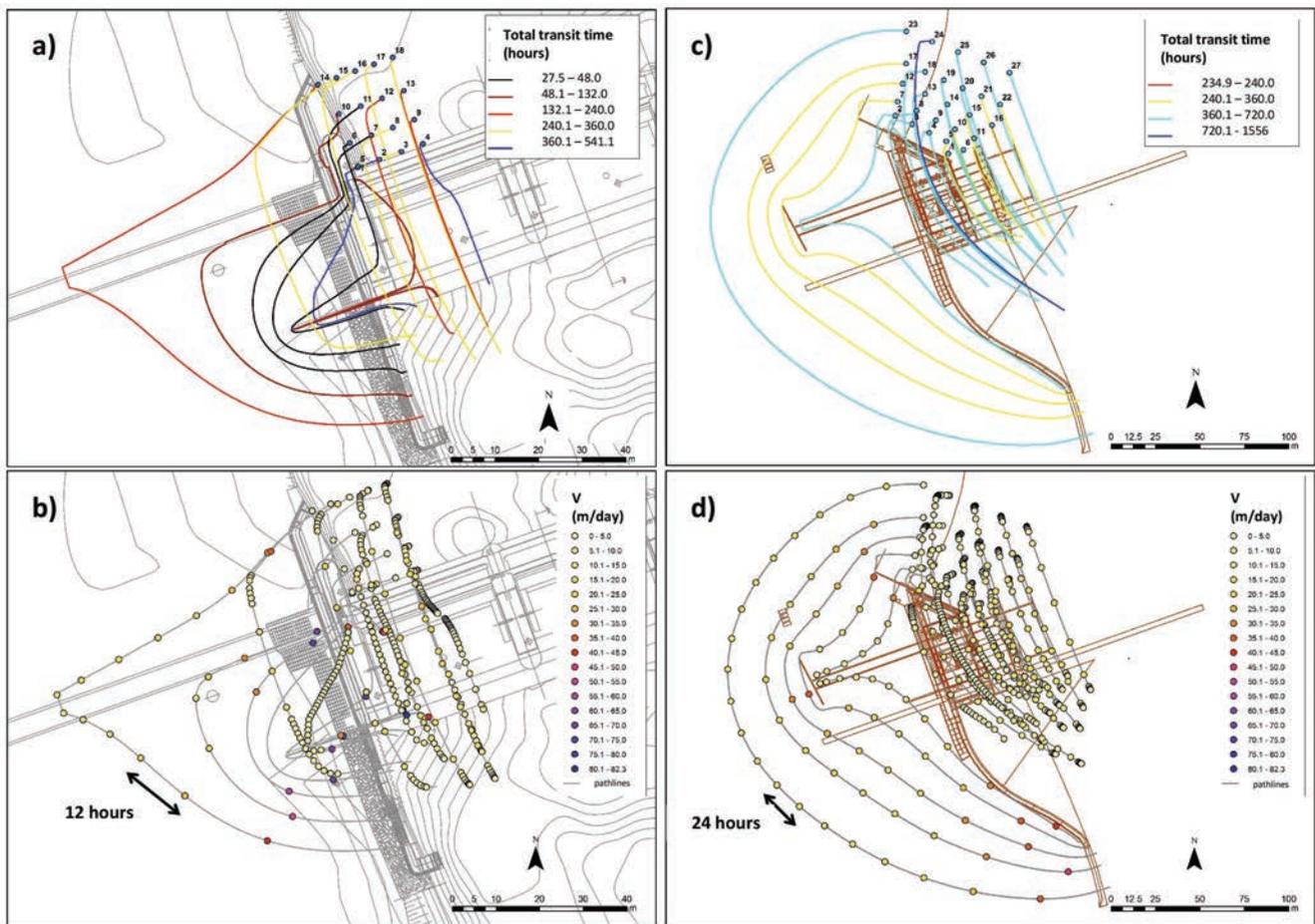


Fig. 14 - Simulazione ante operam: (a) linee di flusso classificate secondo il tempo di transito totale (ore); (b) velocità di filtrazione (m/giorno): ogni segmento compreso tra due pallini corrisponde ad un tempo di transito di 12 ore. Simulazione post operam: (c) linee di flusso classificate secondo il tempo di transito totale (ore); (d) velocità di filtrazione (m/giorno): ogni segmento compreso tra due pallini corrisponde ad un tempo di transito di 24 ore.

Fig. 14 - Ante operam simulation: (a) flow paths classified by total transit time (hours); (b) filtration velocity (m/day): each segment between two markers corresponds to 12 hours of travel time. Post operam simulation: (c) flow paths classified by total transit time (hours); (d) filtration velocity (m/day), each segment between two markers corresponds to 24 hours of travel time.

Conclusioni

Nella progettazione di scavi sotto il livello di falda, gli aspetti più critici sono il dimensionamento confidente dei percorsi di filtrazione e dei parametri idrodinamici dei terreni per raggiungere un sufficiente grado di sicurezza contro il sifonamento ed il sollevamento del fondo scavo. Quando il contesto del sito è complicato da strutture preesistenti e la stratigrafia non è omogenea, è consigliabile uno studio approfondito del sito, basato su numerose indagini dirette che portino ad una convergenza dei risultati e ad una buona confidenza del modello idrogeologico. Questo garantisce una buona affidabilità dei dati di input per la progettazione delle opere di sostegno agli scavi e dei sistemi temporanei di aggotamento.

Il caso qui presentato costituisce un esempio di applicazione di un approccio di studio sperimentale e multidisciplinare che ha permesso di restringere significativamente i range di incertezza della parametrizzazione dell'acquifero. Poiché i parametri determinati sono risultati fondamentali per le successive valutazioni di rischio a sifonamento e sollevamento

fondo scavo previste dalla vigente normativa, l'investimento economico iniziale è stato recuperato attraverso una confidente progettazione, che ha permesso di minimizzare i rischi ed i costi connessi.

Lo studio ha inoltre evidenziato che un campo prova per i test SDT e CRT deve essere sufficientemente "pervasivo" nella sequenza stratigrafica per poter fornire corretti parametri di input alla modellazione numerica. Altrettanto, sfruttare la prova CRT per realizzare una contestuale prova con traccianti permette una verifica incrociata sulla modellazione e definizione dei parametri idrodinamici. Inoltre, la modellazione numerica utilizzata per l'interpretazione delle prove idrodinamiche sperimentali può essere direttamente utilizzata per la simulazione e valutazione degli effetti delle opere sia provvisorie (scavi, opere di sostegno e aggotamenti) che definitive, in termini di modifica dei percorsi di filtrazione. Infine, la corretta parametrizzazione idrodinamica delle unità idrogeologiche costituisce un indispensabile dato di input per i successivi calcoli dei coefficienti di sicurezza.

BIBLIOGRAFIA

- A.G.I. (1977) Raccomandazioni sulla Programmazione ed Esecuzione delle Indagini Geotecniche.
- Andersson MP, Woessner WW, Hunt RJ (2015) Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport. Second Edition. Elsevier, Academic Press, 564
- Behrens H, Beims U, Dieter H, Dietze G, Eikmann T, Grummt T, Hanisch H, Henseling H, Käss W, Kerndorff H, Leibundgut C, Müller-Wegener U, Ronnefahrt I, Scharenberg B, Schleyer R, Schloz W, Tilkes F (2001) Toxicological and ecotoxicological assessment of water tracers. *Hydrogeology Journal* 9: 321–325. doi: 10.1007/s100400100
- Benischke R, Goldscheider N, Smart C (2007) Tracer techniques. In: Goldscheider N, Drew D (eds.) *Methods in Karst Hydrogeology: IAH: International Contributions to Hydrogeology*, 26 CRC Press
- Frank R, Bauduin C, Driscoll R, Kavvas M, Krebs Ovesen N, Orr T, Schuppener B, Gulvanessian H (2005) Designers' Guide to EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical Design – General Rules. Designers' Guide to Eurocodes. January 2005.
- Gorla M (2010) Pozzi per acqua. Manuale tecnico di progettazione. "Water wells. Technical manual for the design". Dario Flaccovio Editore, Palermo
- Harbaugh AW (2005) MODFLOW-2005: the U.S. Geological Survey modular ground-water model - the Ground-Water Flow Process. - U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16 DOI 10.3133/tm6A16
- Hazen A (1892) Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration. 24th Annual Rep., Massachusetts State Board of Health, Pub. Doc. No. 34, 539-556
- Hvorslev MJ (1951) Time-lag and soil permeability in ground-water observations. Bulletin 36, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss
- ISPRA (2018) DIPARTIMENTO PER IL SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA – Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (Legge 464/1984). Pozzo Codice 164149 http://sgi2.isprambiente.it/indagini/scheda_indagine.aspx?Codice=164149
- Jacob CE (1946) Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Trans. Amer. Soc. Of Civil Engrs.*, vol. 112, Paper 2321, pp. 1047-1064.
- Käss W (1998) Tracing techniques in geohydrology. AA Balkema, Rotterdam
- Leibundgut C, Maloszewski P, Külls C (2011) Tracers in hydrology. Wiley
- McDonald MG, Harbaugh AW (1988) A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model - U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1
- NTC 2008 - Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008 "Nuove norme tecniche per le costruzioni"
- NTC 2018 – Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 Aggiornamento delle "Norme tecniche per la costruzioni"
- Pollock DW (1994) User's guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey, Open File Report 94-464
- Schnegg PA (2002) An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement. In: Bocanegra E, Martinez D, Massone H (eds.) *Groundwater and human development 1484-1488*
- Schudel B, Biaggi D, Dervev T, Kozel R, Müller I, Ross JH & Schindler U (2002) Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie – Guide pratique. "Use of artificial tracers in hydrogeology – Practical guide". Rapp. OFEG, Ser. Geol. 3
- Sorbini L, Accorsi CA, Bandini Mazzanti M, Forlani L, Gandini F, Meneghel M, Rigoni A, Sommaruga M (1984) Geologia e geomorfologia di una porzione della pianura a Sud-Est di Verona. "Geology and geomorphology of the plain located South-East of Verona". Mem. Mus. Civ. Storia Nat. di Verona, (IIa Serie) Sez. Sc. Terra n.2
- Sterrett RJ (ed) (2007) Groundwater and wells – 3rd ed. ISBN-13:978-0-9787793-0-6
- UNI (2015) "Pozzi per acqua - Progettazione" UNI 11590:2015
- Veder C (1959) Scavo di fondazione per l'inserimento di una centrale idroelettrica nei relativi canali di carico e di restituzione. "Foundation excavation for the inserting of a hydroelectric power plant in the pertinent intake and discharge canals". *Geotecnica* 4: 157-167
- Walton WC (1963) Efficiency of wells. Mimeographed report of the Illinois State Water Survey Division, Urbana, Illinois, January 1963