

Drenaggio delle acque sotterranee in un tunnel in flysch fratturato: modellazione numerica per la stima delle portate massime

Leonardo Piccinini*
Valentina Vincenzi**
Alessandro Pontin***
Gaspare Andreella****
Sandro D'Agostini*****

* Dipartimento di Geoscienze,
Università di Padova

** Geologo Libero Professionista

*** Geologo Libero Professionista

**** Ingegnere Libero Professionista

***** Responsabile della Direzione
Operativa di Belluno di Veneto Strade
S.p.A.

La realizzazione di gallerie ed opere in sottoterraneo può essere accompagnata dal drenaggio di acque sotterranee in relazione alle caratteristiche idrodinamiche del mezzo attraversato. Il drenaggio delle acque sotterranee, soprattutto quando non previsto in fase di progettazione, può comportare problemi sia durante la realizzazione dell'opera che a lavori ultimati, precludendo le condizioni di sicurezza dello scavo. Il contributo presenta un esempio di modellazione numerica tridimensionale con il codice numerico FEFLOW® per la stima del drenaggio operato da una galleria stradale scavata entro un ammasso roccioso fessurato di origine torbiditica (Formazione del Flysch di Belluno, Eocene p.p.). Le simulazioni, implementate a partire dai dati di monitoraggio idrogeologico acquisiti in corso d'opera ed al termine degli scavi, sono state realizzate a supporto della progettazione del sistema di drenaggio del tunnel ed hanno avuto l'obiettivo di quantificare le portate di drenaggio in condizioni idrologiche estreme (precipitazioni intense con tempo di ritorno 500 anni).

Parole chiave: galleria, drenaggio di acque sotterranee, monitoraggio idrogeologico in continuo, Formazione del Flysch di Belluno, modellazione numerica.

Groundwater drainage into a tunnel in fractured rock mass (flysch): numerical modeling to predict maximum rate of water drainage. Tunnels and underground excavations can induce groundwater drainage, depending on the hydrogeological properties of the involved medium. Groundwater drainage, especially when unforeseen during the design phase, can represent a major issue during drilling operations, precluding the safety conditions. This study presents the results of a three-dimensional numerical model with the code FEFLOW®, which aimed to predict the tunnel inflows induced by a road tunnel drilled in a fractured rock mass (a turbidite, i.e. Flysch di Belluno Formation, Eocene). The simulations were implemented by means of the hydrogeological monitoring data collected during and after the drilling phase and were used to design the final drainage system of the tunnel. Simulations results allowed estimating the maximum groundwater drainage rate during the extreme hydrological events (rainfall with return period of 500 years).

Keywords: tunnel, groundwater drainage, hydrogeological continuous monitoring, Flysch di Belluno Formation, numerical modeling.

Drainage des eaux souterraines dans un tunnel creusé dans une unité rocheuse fracturée (flysch): une modélisation numérique pour prédire le maximum débit des eaux de drainage. La réalisation de tunnels et de travaux souterrains peut provoquer la mise en place d'un drainage des eaux souterraines, qui dépendra des caractéristiques hydrodynamiques du milieu traversé. Le développement de ce drainage, en particulier s'il n'a pas été prévu au cours du projet, peut constituer une difficulté majeure par rapport aux travaux d'excavation, en empêchant le maintien de leurs conditions de sécurité. Cette étude présente un exemple de modélisation tridimensionnelle effectuée avec le code FEFLOW®, visant à quantifier le drainage induit par le creusement d'un tunnel routier dans une masse rocheuse fracturée d'origine turbiditique (Formation de Flysch de Belluno, Eocène). Les simulations, réalisées à partir de mesures en temps réel acquises au cours et après les travaux d'excavation, sont utilisées pour établir les caractéristiques du système de drainage et quantifier le maximum débit des eaux souterraines dans les conditions hydrologiques extrêmes (précipitations avec périodes de retour de 500 ans).

Mots-clés: tunnel, drainage des eaux souterraines, contrôle continu hydrogéologique, Formation de Flysch de Belluno, modélisation numérique.

1. Introduzione

La realizzazione di gallerie ed opere in sottoterraneo può alterare il naturale deflusso delle acque sotterranee, modificando il comportamento del sistema idrogeologico in cui vengono realizzate. In condizioni sature, le gallerie, se non impermeabilizzate, agiscono come strutture drenanti causando l'abbassamento della superficie piezometrica. In funzione della conducibilità idraulica del mezzo si possono verificare episodi di inrush anche rilevanti che, in corso d'opera, possono comportare ritardi nell'avanzamento del fronte di scavo, mentre, a galleria ultimata, la presenza abbondante di acque sotterranee, se non correttamente prevista in fase di progettazione, può portare al periodico allagamento del tunnel precludendone l'utilizzo in condizioni di sicurezza. Diverse sono le metodologie sviluppate per quantificare il drenaggio operato dalle gallerie, dalle semplici relazioni analitiche (Goodman *et al.*, 1965; Chisyaki, 1984; El Tani, 2003; Perrochet, 2005; Perrochet e Dematteis, 2007), alla modellazione numerica bi o tridimensionale (Anagnostou, 1995; Molinero *et al.*, 2002; Zangerl *et al.*, 2003; Vincenzi *et al.*, 2010; Piccinini e Vincenzi, 2010).

Spesso in passato gli ammassi rocciosi di origine torbiditica (flyschoidi) sono stati considerati complessi acquitardi poco produttivi e non soggetti a problematiche idrogeolo-

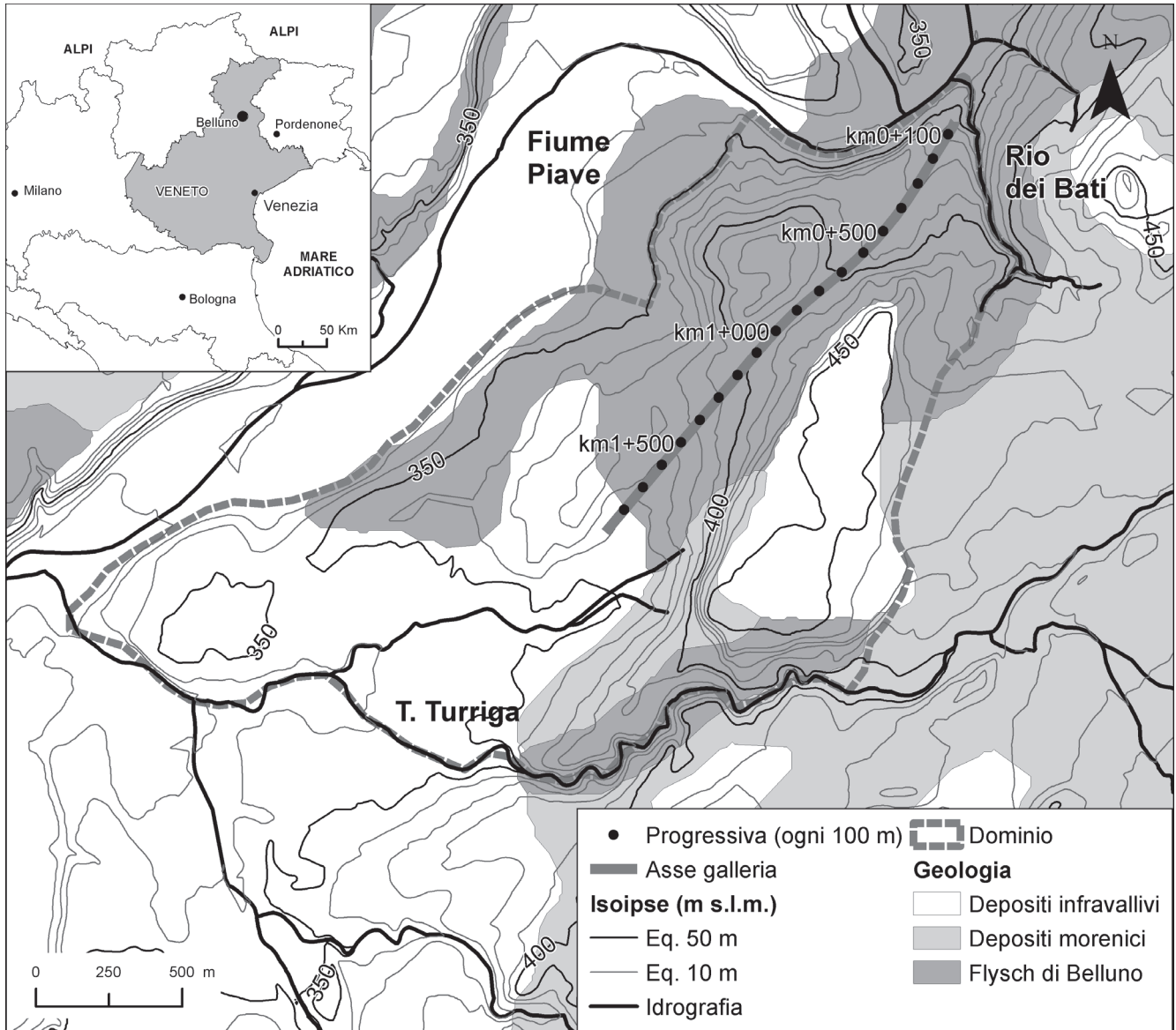


Fig. 1. Inquadramento geologico dell'area di interesse (modificato da "Carta Litostratigrafica di superficie" - SIT Regione Veneto).
 Geological sketch of the study area (modified from "Lithostratigraphic surface map" – Veneto Region GIS).

giche se interessati dalla realizzazione di opere in sotterraneo. Questa impostazione è radicalmente cambiata con la realizzazione dei tunnel della linea ferroviaria ad Alta Velocità Bologna-Firenze, in cui l'attraversamento di torbiditi silicoclastiche (Formazione Marnoso-Arenacea, Basso-Medio Miocene) e calcarenitiche (Formazione di Monte Morello, Basso Paleocene-Medio Eocene) è stata accompagnata da rilevanti problemi idrogeologici (Canuti *et al.*, 2009; Vincenzi *et al.*, 2009, 2013). Le torbiditi in determinate condizioni strutturali, per lo più in prossimità

delle zone di faglia dove è maggiore la densità di fratturazione, possono avere un comportamento acquifero, rilasciando considerevoli volumi di acqua sotterranea (Gargini *et al.*, 2006, 2008). In un tale contesto la realizzazione di una galleria drenante con bassi valori di copertura può favorire l'ingresso delle acque di ricarica zenitale entro il cavo della galleria.

Nel presente studio viene applicata la modellistica numerica di flusso delle acque sotterranee per la simulazione del drenaggio operato da una galleria stradale scavata entro un ammasso roccioso di origine

torbiditica in Provincia di Belluno. L'approccio modellistico adottato è quello del mezzo poroso equivalente (EPM, Equivalent Porous Medium o Single Equivalent Continuum; Bear, 1993), attraverso l'uso del codice tridimensionale agli elementi finiti FEFLOW® (Diersch, 2005). Le simulazioni sono state implementate a partire dai dati di drenaggio rilevati in corso d'opera ed a galleria ultimata, mentre i risultati delle simulazioni sono stati utilizzati per il dimensionamento dei tubi collettori del sistema di smaltimento delle acque di galleria.

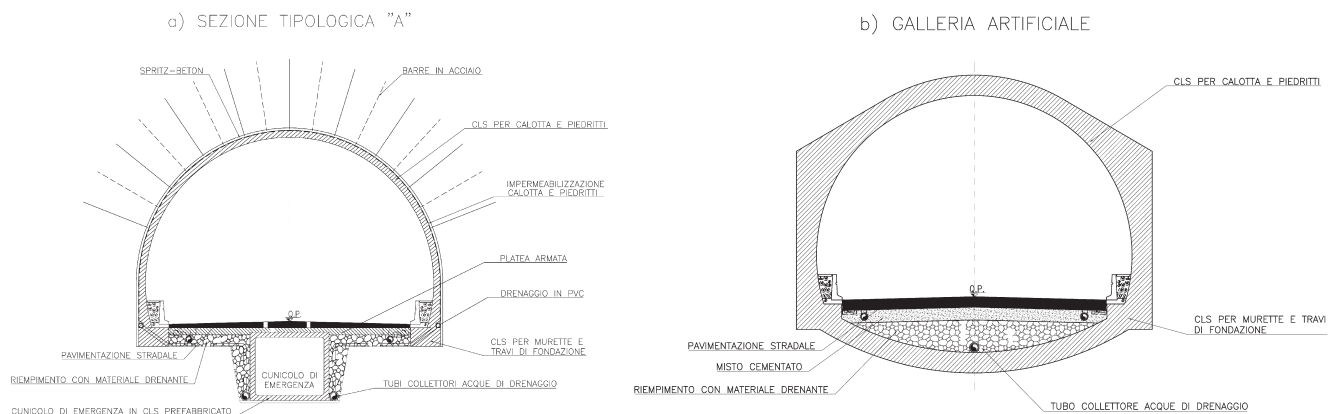


Fig. 2. a) Galleria naturale, sezione di rivestimento corrente tipo A; b) Galleria artificiale, sezione di rivestimento. *Natural tunnel, lining system "corrente tipo A"; b) Artificial tunnel, lining system.*

2. Inquadramento geologico ed idrogeologico

2.1. La Galleria del Col Cavalier

La galleria del Col Cavalier è un tunnel stradale ubicato sul versante sinistro della Valle del Fiume Piave in prossimità della città di Belluno, realizzato da Veneto Strade S.p.A. nell'ambito dei lavori di adeguamento della Strada Provinciale n.1 "di sinistra Piave" (SP1). Si tratta di un tunnel a singola canna che si estende per una lunghezza complessiva di 1884.1 m e che ha previsto, in corrispondenza di entrambi gli imbocchi, la realizzazione di tratti di scavo in artificiale, di lunghezza rispettivamente pari a 21.6 m a NE e 316.5 m a SO, per un totale di 338.1 m (Fig. 1).

La quota del piano della galleria diminuisce progressivamente da NE verso SO con una pendenza pari a circa il 4.1% e con quote comprese tra 352.2 e 344.6 m s.l.m. Le coperture massime variano tra 35 e 40 m tra le progressive (p.) 0+800 e 1+200 km nel tratto centrale di galleria naturale, mentre si riducono gradualmente sino ad annullarsi in corrispondenza dei tratti in artificiale presso gli imbocchi NE e SO (Fig. 1).

Lungo lo sviluppo della galleria sono state realizzate 4 piazzole di sosta (2 per lato a distanza di circa 600 m) e 14 stazioni di emergenza,

ubicata all'interno di sezioni allargate ed entro nicchie appositamente realizzate nei tratti di sezione corrente. La superficie di scavo della sezione tipo è pari a circa 125.1 m², mentre quella della sezione allargata arriva a 172.2 m². Per il rivestimento della galleria sono state progettate 6 sezioni tipo corrente e 3 sezioni tipo allargato (Fig. 2) distribuite lungo il tracciato in base alle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso ed alla copertura. Lungo l'intero sviluppo della galleria, inoltre, è prevista la realizzazione di un cunicolo di emergenza posto al di sotto della carreggiata stradale o lateralmente alla galleria nei tratti in artificiale. Il cunicolo è costituito da una struttura scatolare in calcestruzzo armato di 3 x 2.5 m. Per la raccolta e lo smaltimento delle acque sotterranee provenienti dall'estradosso della galleria naturale è prevista la messa in opera di due tubi collettori posizionati a lato del cunicolo di emergenza in prossimità della sua base (Fig. 2a). Nei tratti in artificiale, invece, è previsto un solo tubo collettore ubicato in posizione centrale tra il piano stradale e l'arco rovescio (Fig. 2b). Il dimensionamento dei suddetti tubi collettori ha richiesto le applicazioni modellistiche per la valutazione della portata di drenaggio in occasione di eventi idrologici estremi.

Lo scavo della galleria è stato realizzato con martellone idraulico da due fronti di scavo:

- imbocco NE, inizio perforazione del tratto in galleria naturale nei primi giorni di aprile 2011 (p. 0+74.18 km), con direzione NE-SO;
- imbocco SO, inizio perforazione a metà gennaio 2012 (p. 1+580.18 km), con avanzamento SO-NE, al termine della realizzazione del tratto in artificiale.

Lo scavo della galleria è terminato nel mese di giugno 2012 ed attualmente sono in corso i lavori di rivestimento e completamento dell'opera.

2.2. Inquadramento geologico

La galleria del Col Cavalier è stata interamente scavata in rocce appartenenti alla Formazione del Flysch di Belluno (FFB; Eocene p.p.) che costituisce il substrato del rilievo del Col Cavalier sul versante sinistro della Valle del Fiume Piave (Fig. 3). Localmente la presenza di FFB è obliterata dall'affioramento di depositi glaciali e fluvioglaciali a tessitura prevalentemente fine limoso-argillosa, che presentano spessori relativamente modesti (Pellegrini, 2000).

Dal punto di vista litologico, FFB è costituita da alternanze di biocalcareni grigio-azzurre, ocracee per alterazione, e prevalenti siltiti marnose e marne grigie ricche di foraminiferi planctonici (Stefani e Grandesso, 1991). Localmente

Tab. 1. Caratteristiche dei piezometri; per l'ubicazione dei piezometri si vedano le Fig. 3 e 4.
 Technical features of piezometers; points locations in Fig. 3 and 4.

ID	Prof. (m da p.c.)	Quota p.c. (m s.l.m.)	Tipo	Prof. Inizio filtro (m da p.c.)	Prof. Fine filtro (m da p.c.)
S1	15	342.5	Foro libero	0	15
S2	10	350	Norton	3	10
S3	15	360	Norton	3	15
S4	10	368.5	Norton	3	10
S5	30	395	Casagrande	12.2	12.5
S6	40	383.5	Casagrande	33.1	33.4
S7	25	383.6	Casagrande	24.2	24.5
S7A	25	386	Norton	10	25
S8A	10	394	Norton	3	10
S10	15	346	Foro libero	0	15
S101a	28.3	384	Norton	5.7	8.7
S101b	28.3	384	Norton	13.5	16.5
S101c	28.3	384	Norton	20.7	23.7
S104a	40	400	Norton	24	27
S104b	40	400	Norton	30	33
S104c	40	400	Norton	35	40
S104BISa	25	396	Norton	14	17
S104BISb	25	396	Norton	19	25
S106a	45	402	Norton	20.5	24.5
S106b	45	402	Norton	28.2	31.2
S106c	45	402	Norton	34	37
S107a	25	380	Norton	5.5	8.5
S107b	25	380	Norton	16.5	19.5
S107c	25	380	Norton	22	25
S108a	30	374	Norton	6	9
S108b	30	374	Norton	11	15
S108c	30	374	Norton	17	20
S109	10	387	Norton	1	10

queste alternanze includono breccie calcaree e biocalcareni biancastre in grossi banchi (Costa *et al.*, 1996). In corrispondenza del tracciato della galleria il flysch mantiene una direzione di immersione costante verso

NO e varia il suo angolo di inclinazione passando da 50-60° nei primi 550 m circa (dall'imbocco NE) a 25-0° nel rimanente tratto. La giacitura degli strati è concorde con le orientazioni tipiche del fianco meridiona-

le della Sinclinale di Belluno, una importante piega asimmetrica sud-vergente di ampiezza superiore ai 10 km, con asse di direzione OSO-ENE immergente a NO e situata a letto della Linea di Belluno (Doglioni,

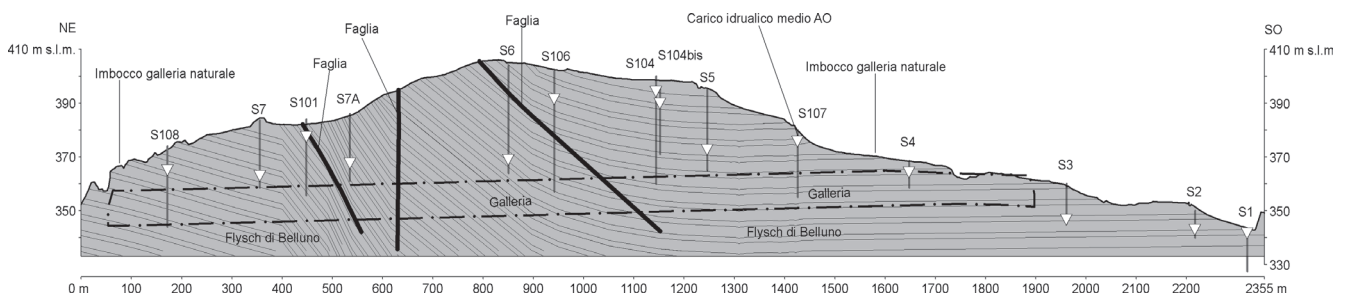


Fig. 3. Profilo geologico lungo il tracciato della galleria.
 Geological section along the tunnel.

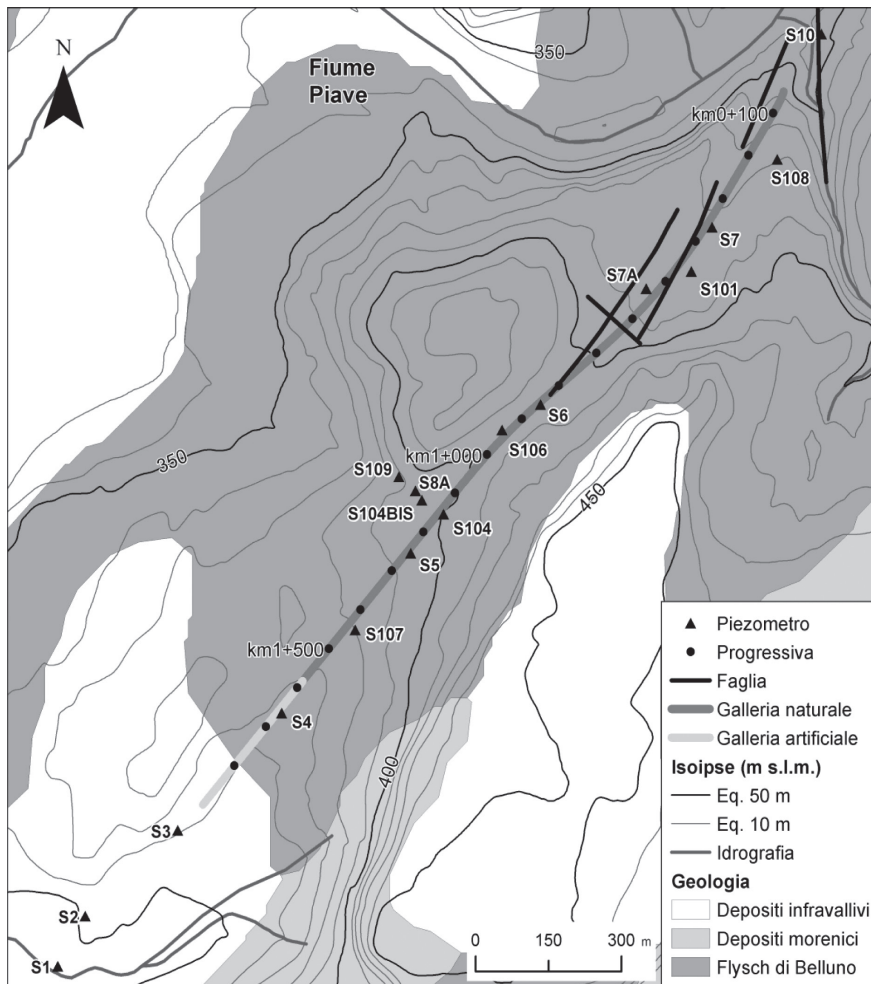


Fig. 4. Ubicazione delle faglie e della rete piezometrica su base geologica.
Location of fault lines and piezometric network on geological map.

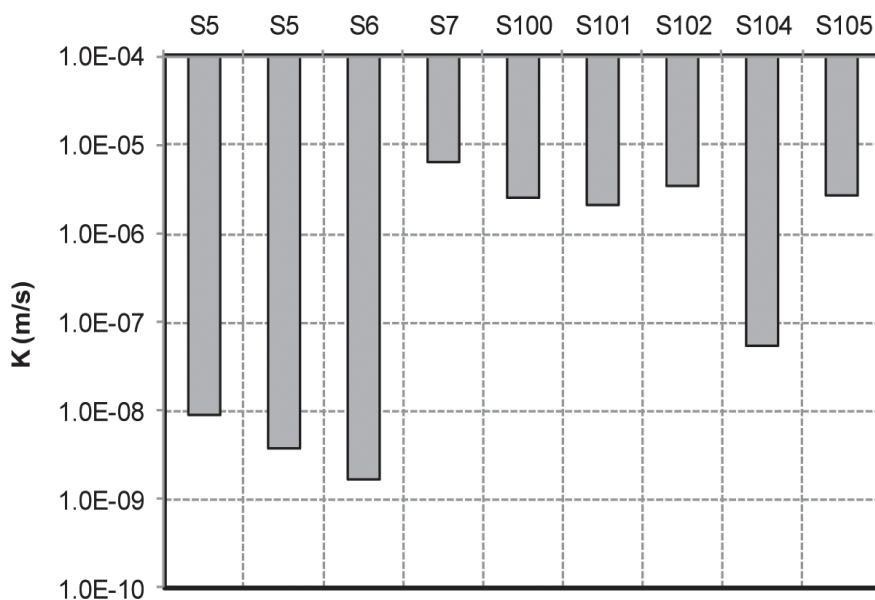


Fig. 5. Valori di conducibilità idraulica (K) derivati dalle prove Lugeon; per l'ubicazione dei punti di misura si veda Fig. 4.
Hydraulic conductivity values obtained from Lugeon tests; points locations in Fig. 4.

1987; Costa *et al.*, 1996; D'Ambrogi e Doglioni, 2008), Lungo il tracciato della galleria sono presenti 3 faglie che la intercettano alle p. 0+451, 0+623 e 0+808 km (Fig. 4). La prima e la terza faglia intersecano la galleria con un basso angolo, mentre la seconda è sub-verticale ed ha una direzione circa perpendicolare all'asse della galleria. Questi elementi tettonici condizionano lo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso lungo il tracciato, dando luogo a zone intensamente fratturate e quindi più permeabili.

2.3. Monitoraggio idrogeologico ante operam ed in corso d'opera

In prossimità del tracciato della galleria la conducibilità idraulica (K) del flysch, stimata attraverso 9 prove Lugeon realizzate a profondità compresa tra 16 e 35 m da piano campagna (p.c.), varia entro 3 ordini di grandezza tra $1.64E-09$ e $6.35E-06$ m/s (Fig. 5), in ragione della elevata eterogeneità dell'ammasso roccioso, dovuta sia alla composizione litologica che allo stato di fratturazione.

L'andamento del carico idraulico in condizioni ante operam ed in corso d'opera è stato monitorato attraverso la rete di piezometri realizzata durante le diverse fasi di progettazione della galleria. Si tratta di 26 piezometri, 23 di tipo Norton, 3 celle di Casagrande e 2 fori di sondaggio in roccia non attrezzati, realizzati lungo il tracciato tra il 2008 ed il 2010 (Tab. 1; Fig.3 e Fig. 4). Le verticali S101, S104, S104bis, S106 e S107 sono costituite da tubi piezometrici multipli (2 o 3, identificati dal suffisso a, b, c) di tipo Norton filtrati a profondità diversa ed isolati tra loro con livelli di bentonite.

Il monitoraggio ante operam (AO) è stato realizzato con una frequenza di acquisizione variabile tra 1 e 13 giorni in due periodi distinti: ottobre-novembre 2008 per i piezometri doppi o tripli e febbraio-marzo 2008 per il resto della rete di moni-

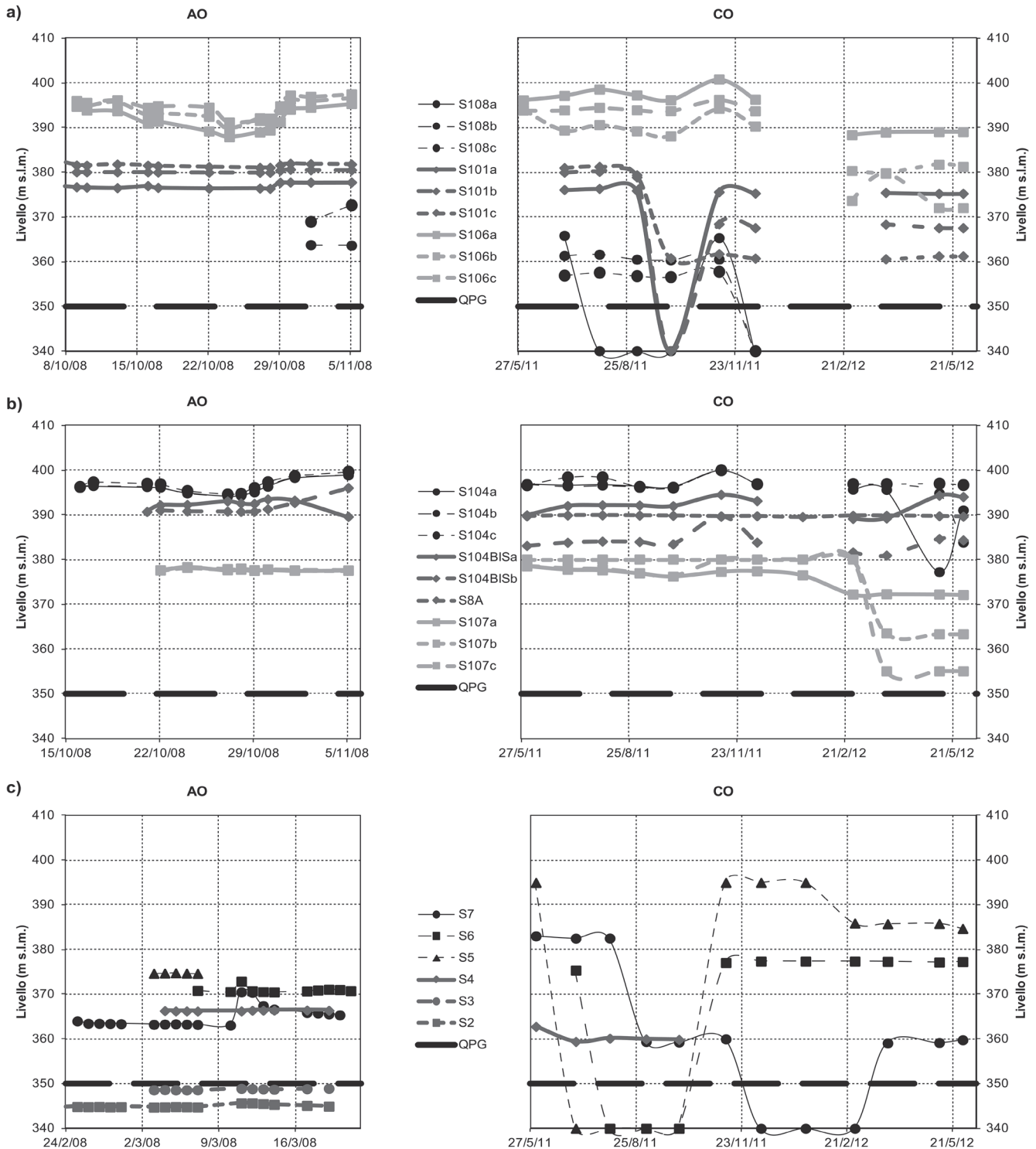


Fig. 6. Dati del monitoraggio piezometrico ante operam (AO) ed in corso d'opera (CO): a) S108, S101 e S106; b) S104, S104BIS, S8A e S107; c) S7, S6, S5, S4, S3 ed S2; QPG, quota media del piano galleria.
 Groundwater level monitoring data of AO phase and CO phase: a) S108, S101 e S106; b) S104, S104BIS, S8A e S107; c) S7, S6, S5, S4, S3 and S2; QPG, tunnel mean altitude.

toraggio (Fig. 6a, b e c). Il monitoraggio in corso d'opera (CO) è stato realizzato con cadenza circa mensile su tutti i piezometri della rete di monitoraggio per il periodo compreso

tra maggio 2011 e maggio 2012 (Fig. 6a, b e c). AO risulta non sufficiente per delineare in modo completo il regime idrologico dell'ammasso roccioso prima dell'inizio degli scavi,

mentre CO, terminando prima del termine degli scavi, non permette di valutare l'evoluzione del carico idraulico a galleria ultimata. In alcuni casi infatti (triplette: S106, S104,

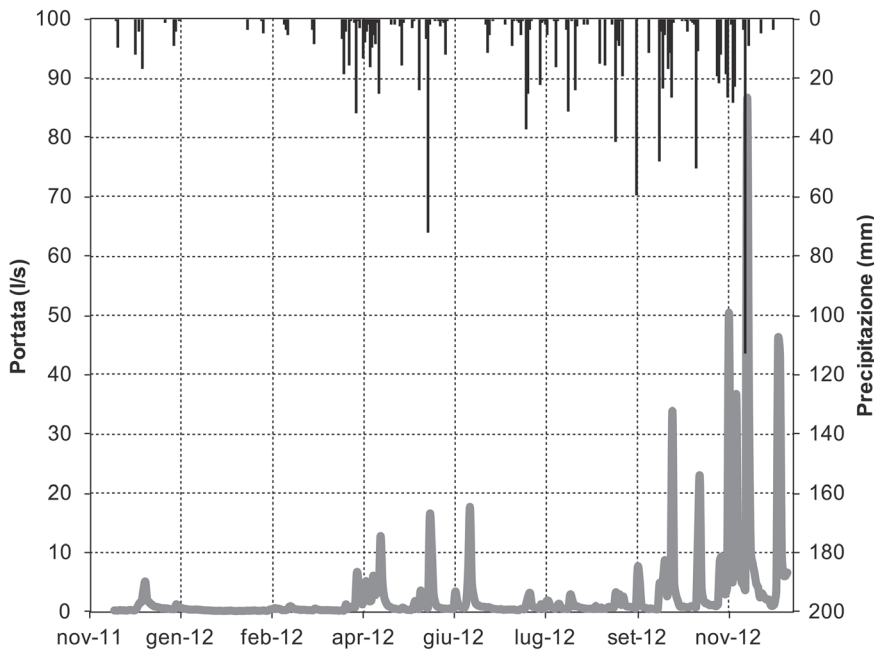


Fig. 7. Idrogramma giornaliero della galleria Col Cavalier nel periodo novembre 2011 - dicembre 2012 (in grigio) e precipitazioni giornaliere (in nero).

Daily hydrogram of groundwater drainage from Col Cavalier Tunnel during the time span november 2011 - december 2012 (grey color) and daily rainfall histogram (black color).

doppietta S104BIS e piezometro S5) non è chiaro se gli abbassamenti del carico idraulico registrati con CO siano imputabili al drenaggio della galleria o siano dovuti alla scarsità di precipitazioni che accompagna lo scavo tra novembre 2011 e marzo 2012. Risultano sicuramente impattate le triplette: S108, S101, S107 ed i piezometri S4 ed S7, mentre non mostrano segni di interferenza i piezometri S8A ed S6.

3. Materiali e metodi

3.1. Monitoraggio del drenaggio della galleria

A partire da novembre 2011 (p. 0+597 km) è stato realizzato un sistema di monitoraggio in continuo della portata drenata dalla galleria in corso di avanzamento lungo il fronte NE che, a seguito del completamento degli scavi nel giugno 2012, ha consentito il monitoraggio della portata drenata dalla galleria

naturale sino alla p. 1+580.18 km. Per il monitoraggio della portata di drenaggio è stato utilizzato un trasduttore di pressione con data-logger integrato, installato nella vasca di raccolta delle acque di scarico provenienti dal fronte di avanzamento da NE a SO. L'acquisizione del livello è avvenuta con cadenza oraria, mentre per la trasformazione livello-portata è stata utilizzata una scala di deflusso sperimentale.

In Figura 7 è rappresentato l'idrogramma giornaliero della galleria nel periodo novembre 2011 - dicembre 2012, a confronto con le precipitazioni registrate presso il pluviometro

di Belluno Aeroporto (rete meteorologica dell'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto; ARPAV). L'idrogramma mostra l'interazione tra la galleria e l'ammasso roccioso durante gli ultimi 7 mesi di scavo e nei 7 mesi successivi al completamento dei lavori. Come si può vedere, sia in corso d'opera che a galleria ultimata la portata di drenaggio è sempre in relazione diretta con il regime pluviometrico; non si registrano episodi di inrush riconducibili allo svuotamento parziale o totale di zone acquifere entro l'ammasso roccioso. Nel periodo di monitoraggio è stata registrata una portata media oraria pari a circa 1.13 l/s con valori massimo e minimo rispettivamente di 222.7 e 0.12 l/s.

Una caratterizzazione più dettagliata del regime di drenaggio può essere fatta confrontando portata e precipitazione oraria in occasione di 4 eventi particolarmente significativi, utilizzati per la calibrazione del modello di flusso (Tab. 2), sia in corso d'opera (20-22 maggio 2012) che a galleria ultimata. In particolare si può osservare come il ritardo tra l'inizio della precipitazione e l'aumento della portata di drenaggio sia quantificabile in 7-8 ore per precipitazioni di intensità (I_{nt}) superiore a 2 mm/ora, mentre si registra un aumento del ritardo al diminuire di I_{nt} (Tab. 3). Il ritardo corrisponde al tempo necessario all'infiltrazione per attraversare l'insaturo. Infine, la portata media di drenaggio per metro lineare (Q_l) sembra essere condi-

Tab. 2. Caratteristiche degli eventi di precipitazione utilizzati per la calibrazione del modello di flusso; P_{tot} precipitazione totale; I_{nt} intensità di precipitazione.

Rainfall events parameters used for the groundwater model calibration; P_{tot} total rainfall; I_{nt} rainfall intensity.

Inizio	Fine	Durata (ore)	P_{tot} (mm)	I_{nt} (mm/ora)	Stato galleria
20/05/2012	21/05/2012	30	77.4	2.58	in avanzamento
04/11/2012	05/11/2012	29	49.8	1.72	terminata
10/11/2012	12/11/2012	42	122.8	2.92	terminata
27/11/2012	29/11/2012	47	109.6	2.33	terminata

Tab. 3. Caratteristiche degli eventi di drenaggio utilizzati per la calibrazione del modello di flusso; Ritardo, intervallo di tempo tra l'inizio della precipitazione ed inizio dell'incremento della portata di drenaggio; Q_{max} , portata massima di drenaggio; Q_m , portata media di drenaggio; Q_i , portata media di drenaggio per metro lineare di galleria.

Features of tunnel drainage events chosen for the model calibration; Ritardo, time span between rainfall start and start of tunnel drainage rising up; Q_{max} , maximum drainage flow rate; Q_m , average drainage flow rate; Q_i , average drainage normalized flow rate (per meters of tunnel).

Inizio	Fine	Ritardo (ore)	Durata (ore)	Q_{max} (l/s)	Q_m (l/s)	Q_i (l/s*m)
21/05/2012	25/05/2012	7	110	35.66	7.12	0.008
04/11/2012	06/11/2012	14	52	71.84	22.49	0.015
10/11/2012	14/11/2012	8	77	222.70	41.17	0.027
27/11/2012	01/12/2012	7	85	115.13	28.91	0.019

zionata non solo dalla precipitazione totale (P_{tot}) e da I_{nt} , ma anche dalle condizioni idrologiche che precedono l'inizio della pioggia. Il 4-6 novembre, ad esempio, si registra una Q_i circa doppia rispetto a quella di maggio, nonostante sia P_{tot} che I_{nt} siano inferiori di circa 1/3 (Tab. 3). Il mese di maggio segue una stagione invernale particolarmente seccata, mentre l'autunno successivo si registrano piogge abbondanti che iniziano progressivamente a saturare l'ammasso roccioso.

3.2. Modello idrogeologico concettuale

Il Flysch di Belluno, interessato dallo scavo della galleria Col Cavalier, è classificabile dal punto di vista idrogeologico come un mezzo permeabile per frattura dal comportamento acquitardo/acquifero in ragione della densità di fratturazione. Il flysch, localmente, è sovrastato da depositi glaciali e fluvioglaciali di natura prevalentemente fine e spessore modesto che a seguito dei dati di scavo della galleria sono da ritenersi privi di circolazione idrica sotterranea. Le prove di permeabilità confermano che l'ammasso roccioso è un mezzo estremamente eterogeneo con valori di K che variano di oltre 3 ordini di grandezza.

In condizioni ante operam il sistema è alimentato dalla ricarica laterale proveniente da monte e della ricarica zenitale attraverso i depositi

quaternari o direttamente dal flysch, mentre il recapito finale è costituito dalle alluvioni di fondovalle del Fiume Piave. Il gradiente idraulico segue approssimativamente la morfologia del versante.

Lo scavo della galleria drenante ha alterato la condizione naturale. I dati piezometrici del CO mostrano che, nelle zone a maggiore grado di fratturazione e/o minore copertura, il drenaggio operato dal tunnel ha abbassato il carico idraulico a quote prossime al piano della galleria. I rilievi piezometrici disponibili fotografano una condizione transitoria in cui gli effetti del drenaggio lateralmente non superano 60/65 m dall'asse del tunnel ed in cui, nelle porzioni a maggiore copertura, l'ammasso roccioso al di sopra della volta della galleria non è ancora completamente desaturato.

In occasione dei principali eventi meteorici l'infiltrazione induce variazioni significative nella portata di drenaggio della galleria. Il monitoraggio in continuo mostra che i tempi di transito necessari ad attraversare l'insaturo e raggiungere la tavola d'acqua o il cavo della galleria sono compresi tra 7 e 15 ore in funzione delle condizioni idrologiche antecedenti la precipitazione. L'assenza di una relazione diretta tra la precipitazione, sia come valore totale (P_{tot}) che come intensità (I_{nt}), e la portata di drenaggio per metro lineare (Q_i) ha reso indispensabile l'impiego della modellistica numerica per pre-

vedere gli effetti di condizioni idrologiche estreme sul drenaggio del tunnel. Una simulazione numerica tridimensionale di flusso, se calibrata sui dati di monitoraggio, è l'unico strumento in grado di considerare tutte le componenti di questo sistema nelle tre dimensioni dello spazio ed in funzione del tempo.

3.3. Approccio modellistico

L'approccio EPM consiste nel mediare le proprietà idrodinamiche della matrice rocciosa e delle discontinuità su un volume sufficientemente ampio da poter essere considerato statisticamente rappresentativo (REV, Representative Elementary Volume; Long *et al.*, 1982; Kanit *et al.*, 2003). All'interno del REV si assume che la fratturazione sia distribuita in modo casuale ed uniforme e che l'apertura delle discontinuità sia tale da impedire moti di tipo turbolento, accettando la validità delle legge di Darcy. Si tratta di un approccio modellistico che non richiede una caratterizzazione specifica delle proprietà geometriche ed idrodinamiche delle singole fratture, che necessita di un basso sforzo computazionale e che fornisce buoni risultati su domini di modellazione arealmente estesi (Mun e Uchrin, 2004). In particolare l'approccio EPM rappresenta un ottimo compromesso tra la simulazione rigorosa del flusso nelle singole fratture, previ-

sta negli approcci: Explicit Discrete Fracture (EDF) o Discrete Fracture Network (DFN; Bear, 1993), e quella eccessivamente semplificata dei modelli matematici di tipo analitico.

Svariati sono gli esempi relativi all'impiego dell'approccio EPM per la simulazione, sia del flusso che del trasporto, in acquiferi fratturati, anche di tipo carsico, presenti in letteratura (Pankow *et al.*, 1986; Angelini e Dragoni, 1997; Gburek *et al.*, 1999; Rayne *et al.*, 2001; Scanlon *et al.*, 2003; Paradis *et al.*, 2007; Worthington, 2009; Vincenzi *et al.*, 2010). La maggior parte degli autori concorda nell'individuare l'approccio EPM particolarmente efficace per la simulazione dei sistemi di flusso a scala regionale, anche in acquiferi carsici, mentre ad una scala inferiore, quale quella di versante, può essere utilizzato in tutti quei contesti in cui non sono presenti fenomeni di dissoluzione carsica rilevanti.

Nel caso del modello di flusso della galleria Col Cavalier l'approccio EPM è stato sviluppato attraverso il codice tridimensionale agli elementi finiti FEFLOW® (Trefry e Muffels, 2007).

3.4. Simulazioni implementate

Tutte le simulazioni sono state realizzate allo stato transitorio e sono suddivisibili in due tipologie: simulazioni di calibrazione (SC) e simulazioni previsionali (SP).

Le SC riproducono il drenaggio operato dalla galleria durante 4 eventi di precipitazione registrati con il monitoraggio delle portate: 1 durante le operazioni di scavo e 3 a galleria ultimata (Tab. 4). Gli obiettivi delle SC sono l'ottimizzazione dei parametri idrodinamici dell'acquifero e la determinazione del coefficiente di infiltrazione sperimentale (CI) da utilizzare nelle SP per l'assegnazione della ricarica zenitale.

Le SP riproducono il drenaggio potenziale operato dalla galleria in condizioni idrologiche estreme quali

Tab. 4. Simulazioni di calibrazione.

Calibration simulations.

Simulazione	Inizio	Fine	Durata (ore)	Stato galleria
SC-1	20/05/2012	29/05/2012	222	in avanzamento
SC-2	04/11/2012	15/11/2012	274	terminata
SC-3	27/11/2012	02/12/2012	109	terminata

Tab. 5. Simulazioni previsionali.

Prediction simulations.

Simulazione	Durata ricarica (ore)	Tipo ricarica	Durata totale (giorni)
SP-1a	1	costante	6
SP-1b	1	crescente	6
SP-2a	2	costante	6
SP-2b	2	crescente	6
SP-3a	3	costante	6
SP-3b	3	crescente	6
SP-6a	6	costante	6
SP-6b	6	crescente	6
SP-12a	12	costante	6
SP-12b	12	crescente	6
SP-18a	18	costante	6
SP-18b	18	crescente	6
SP-24a	24	costante	6
SP-24b	24	crescente	6

quelle indotte dal verificarsi di eventi di precipitazione derivati dalle curve di possibilità pluviometrica per un tempo di ritorno di 500 anni (Autorità di Bacino dell'Alto Adriatico, 1996). Nel dettaglio sono stati analizzati gli effetti di precipitazioni di durata rispettivamente pari a: 1, 2, 3, 6, 12, 18 e 24 ore, ipotizzando, per ciascuna durata, due modalità di realizzazione dell'evento (Tab. 5):

- precipitazione costante su tutto l'intervallo temporale (ricarica tipo a);
- precipitazione progressivamente crescente secondo una funzione lineare a partire da un valore nullo all'inizio dell'evento (ricarica tipo b).

In tutte le SP la pioggia è stata convertita in ricarica zenitale applicata al top del dominio di modella-

zione attraverso il CI sperimentale determinato con le SC.

3.5. Discretizzazione

Il dominio di modellazione è costituito da un poligono di forma irregolare ed estensione pari a 3.72 km², compreso tra la Valle del Fiume Piave in direzione N-NO ed il corso del Torrente Turriga verso S-SO; a NE è delimitato dal Rio dei Bati, mentre verso E-SE si interrompe ai piedi dell'abitato di Castion (Fig. 1).

Sul piano orizzontale il dominio è stato discretizzato con una mesh triangolare costituita da 52,416 nodi e 91,128 elementi di dimensione variabile, più fitti e di dimensioni minori lungo l'asse della galleria allo scopo di favorire la riproduzione del

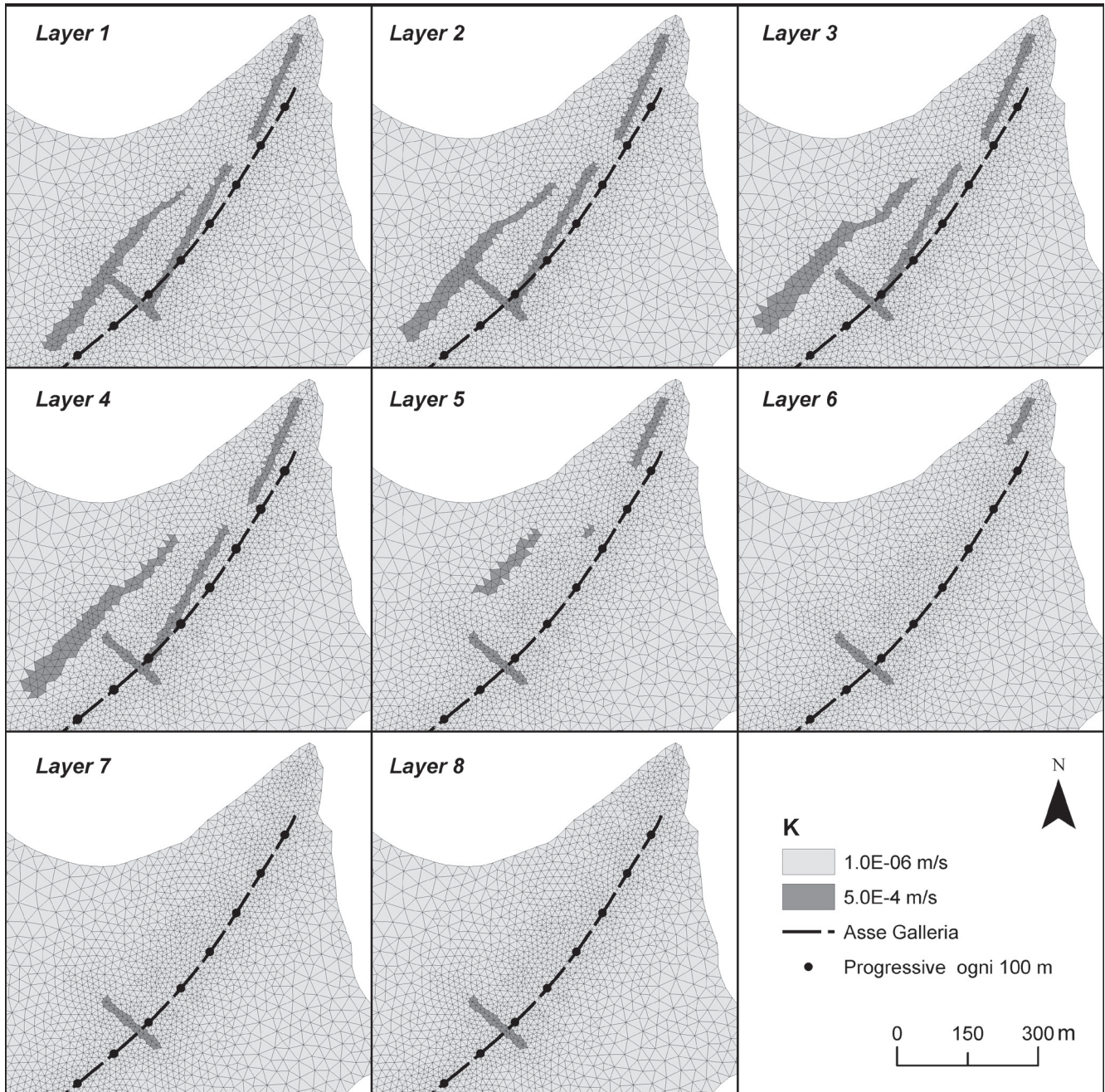


Fig. 8. Distribuzione delle unità idrogeologiche nei diversi layers: in grigio chiaro il flysch normalmente fratturato ed in grigio scuro il flysch a maggior grado di fratturazione.

Hydrogeological units distribution in the different layers: with light grey the normally fractured flysch, with dark grey the highly fractured flysch.

gradiente idraulico indotto dal drenaggio del tunnel.

Lungo la verticale sono stati individuati 8 layers di spessore variabile compresi tra la superficie (slice) di top, derivata dal modello altimetrico della Regione Veneto con passo di 25 x 25 m, e quella di bottom costituita da una superficie piana a 300 m s.l.m. In particolare la slice 6 è un

piano inclinato a debole pendenza che segue le quote del piano galleria.

3.6. Parametrizzazione

All'interno del dominio di modellazione, sulla base del modello idrogeologico concettuale, sono state distinte 2 zone di K. La prima

zona rappresenta l'ammasso roccioso normalmente fratturato, mentre la seconda corrisponde alle zone a maggiore densità di fratturazione e coincide con l'andamento delle faglie (Fig. 8). L'orientazione spaziale degli elementi tettonici è stata mantenuta assegnando la K delle faglie a diversi elementi sui diversi layers cercando di approssimarne l'immersione reale

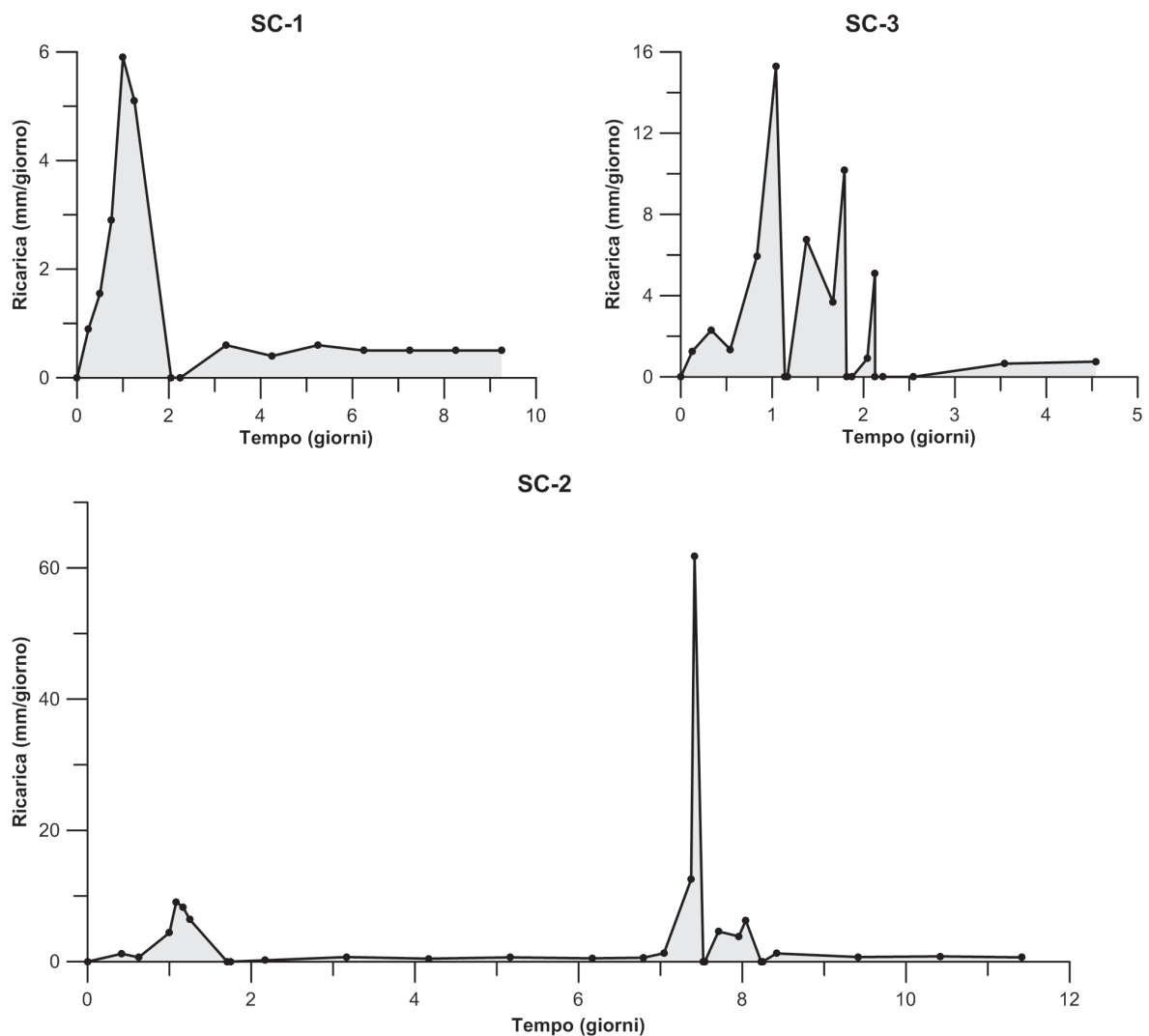


Fig. 9. Ricarica assegnata alle simulazioni di calibrazione.
Infiltration rate applied to calibration simulations.

(Fig. 8). A seguito del processo di calibrazione, la K , assegnata come proprietà isotropa, è risultata rispettivamente pari a $1.0E-06$ m/s per il flysch normalmente fratturato e $5.0E-04$ m/s per il flysch a maggiore densità di fratturazione.

I parametri di immagazzinamento: storage compressibility (o specific storage o immagazzinamento specifico, S_s) e storativity (o specific yield, S_y) sono stati assegnati costanti su tutto il dominio e pari rispettivamente a $3.0E-07$ m⁻¹ e $3.0E-07$ (adimensionale). Si tratta di valori molto bassi anche per un ammasso roccioso di origine torbiditica che derivano dalla calibrazione e che nelle fasi preliminari del processo

erano stati differenziati in accordo con la K . Questa distinzione però, durante l'ottimizzazione dei parametri, si è rivelata inadeguata alla riproduzione del rapido decremento della portata di drenaggio al termine della precipitazione (Fig. 7).

3.7. Condizioni al contorno

Il gradiente piezometrico nel versante sinistro della valle del Fiume Piave è stato riprodotto utilizzando una condizione di 1° tipo o di carico idraulico assegnato (Dirichlet) sul limite N-NO (valle idrogeologico) ed una condizione del 2° tipo o di flusso assegnato (Neuman) sul limi-

te E-SE (monte idrogeologico). Nel primo caso è stato utilizzato un carico idraulico variabile da 310 a 330 m s.l.m. che rappresenta il livello di base del sistema idrogeologico, mentre nel secondo è stato utilizzato un flusso costante per unità di superficie pari a $1.0E-04$ m/giorno, che riproduce l'alimentazione del versante a monte del dominio di modellazione. La condizione di 1° tipo verso valle ha lo scopo di simulare l'alimentazione del sistema ai depositi alluvionali di fondovalle del Piave, mentre la condizione di 2° tipo è indispensabile per controllare il flusso in ingresso da monte nelle simulazioni previsionali. Il valore di tale flusso è stato derivato sulla base dei risulta-

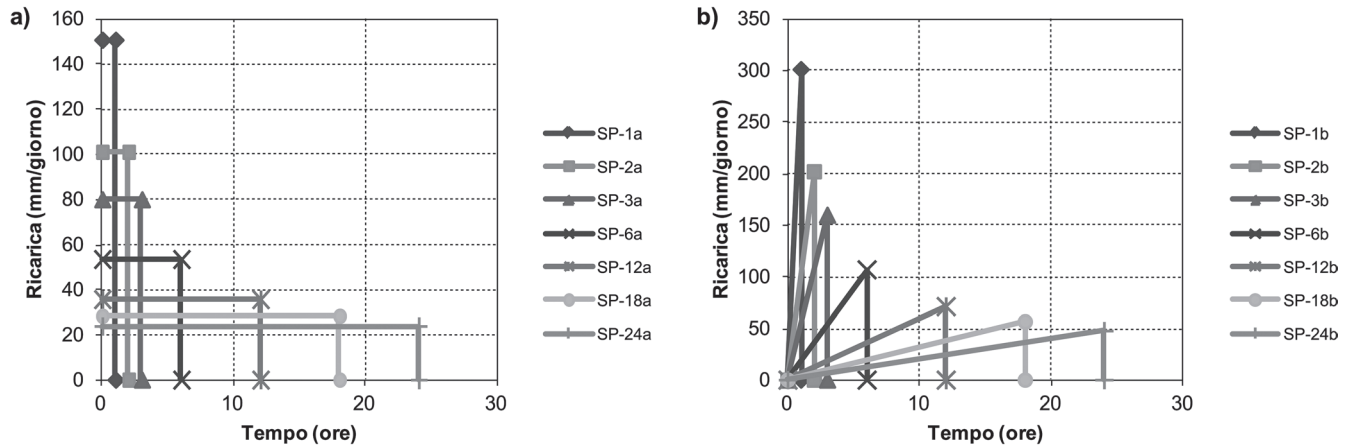


Fig. 10. Ricarica assegnata alle simulazioni previsionali: a) costante; b) secondo una funzione lineare.
Infiltration rate applied to prediction simulations: a) constant; b) variable according to a simplified linear function.

Tab. 6. Parametri statistici della calibrazione nelle diverse simulazioni: N, numero dei target di confronto; R_{max} , residuo massimo; R_{min} , residuo minimo; MR, media dei residui; MAR, media assoluta dei residui; RMS, scarto quadratico medio; nRMS, scarto quadratico medio normalizzato.

Statistical parameters of calibration procedure in the different simulations: N, number of target values; R_{max} , maximum residual; R_{min} , minimum residual; MR, residual mean; MAR, absolute residual mean; RMS, root mean squared; nRMS, normalized root mean squared.

Simulazione	N	R_{max} (l/s)	R_{min} (l/s)	MR (l/s)	MAR (l/s)	RMS (l/s)	nRMS (%)
SC-1	14	0.33	-0.11	0.06	0.10	0.13	0.41
SC-2	26	0.17	-0.31	-0.02	0.09	0.12	0.05
SC-3	17	1.05	-0.19	0.09	0.13	0.27	0.24

ti di alcune simulazioni preliminari allo stato stazionario. Sui limiti NE e S-SO sono state utilizzate due condizioni di 3° tipo o di flusso dipendente dalla differenza di carico (Cauchy) che riproducono l'interazione acque sotterranee/superficiali rispettivamente in corrispondenza del Rio dei Bati e del Torrente Turriga. In entrambi i casi i parametri utilizzati per la condizione di 3° tipo sono: un battente idrico di 50 cm sopra la quota del piano campagna ed una conduttanza (transfer rate) pari a 0.001 m^{-1} .

Sulla prima slice, per riprodurre la ricarica zenitale, è stata applicata una condizione di flusso assegnato, uniforme su tutto il dominio di modellazione ma variabile in funzione del tipo di simulazione, mentre alla base del dominio è stata applicata una condizione di flusso assegnato nullo. Nelle SC, i valori di ricarica sono stati derivati dal processo di ca-

librazione (Fig. 9), mentre nelle SP sono stati determinati applicando il CI medio della calibrazione alle precipitazioni con tempo di ritorno di 500 anni ed ipotizzando due modalità di distribuzione: la prima costante e la seconda crescente secondo una funzione lineare (Fig. 10).

Infine il drenaggio operato dalla galleria è stato simulato attraverso una condizione seepage face di FE-FLOW, applicata alla slice 6, che impone un comportamento solo drenante ad una condizione del 1° tipo e che di conseguenza rimuove acqua in relazione della differenza di carico tra l'ammasso roccioso ed il piano della galleria. La funzione seepage face è stata applicata all'intero tracciato nelle simulazioni SC-2, SC-3 ed in tutte le simulazioni previsionali, mentre è stata applicata unicamente alla porzione di tracciato scavata nella simulazione SC-1.

4. Risultati

4.1. simulazioni di calibrazione

I risultati delle simulazioni di calibrazione sono di buon livello dal punto di vista sia qualitativo, che quantitativo. Le simulazioni riescono a riprodurre i tratti caratteristici degli idrogrammi sperimentali (Fig. 11), mentre utilizzando come target di calibrazione le portate di drenaggio ogni 6 o 24 ore si ottengono valori di scarto quadratico medio normalizzato (nRMS) inferiori allo 0.5% e residui in valore assoluto (MAR) compresi tra 0.09 e 0.13 l/s (Tab. 6).

I valori di K assegnati al REV per rappresentare l'ammasso roccioso normalmente fratturato sono congrui con i risultati delle prove di permeabilità in sito, mentre quelli utilizzati per l'ammasso roccioso a

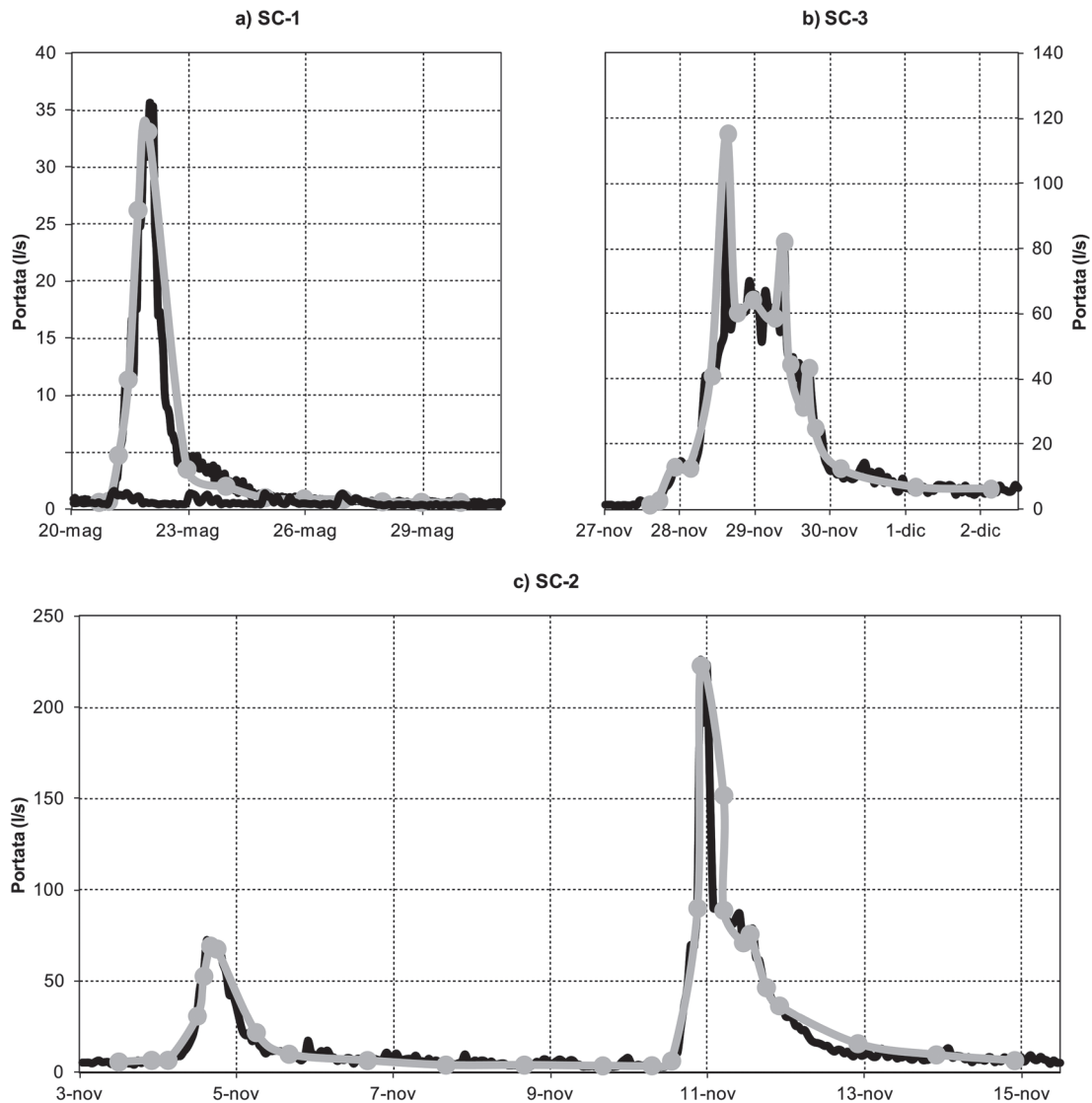


Fig. 11. Risultati delle simulazioni di calibrazione, confronto tra la portate misurate (in nero) e le portate calcolate (in grigio): a) SC-1; b) SC-3 e c) SC-2.

Results of calibration simulations, comparison between measured (black) and calculated (grey) flow rates: a) SC-1; b) SC-3 and c) SC-2.

maggiore densità di fratturazione sono più elevati di oltre 2 ordini di grandezza, ma comunque in linea con i valori di K utilizzati in letteratura per la simulazione del flusso in litologie analoghe (Piccinini e Vincenzi, 2010; Piccinini *et al.*, 2012). S_s del REV è congruo con le caratteristiche litologiche del mezzo, mentre S_y è di molto inferiore all'1%, ad indicare che la circolazione idrica sotterranea avviene esclusivamente attraverso la rete di fratture.

Il coefficiente di infiltrazione sperimentale (CI), derivato dal confronto tra ricarica applicata e precipitazione totale, è pari rispetti-

vamente a: 7.98% per SC-1, 8.49% per SC-2 e 8.26% per SC-3, con un valore medio di 8.25%. Anche in questo caso si tratta di valori coerenti con i CI disponibili in letteratura per litologie di origine torbidi-tica (flysch fratturati; Civita, 2005; Gargini *et al.*, 2006; Piccinini *et al.*, 2012).

In Figura 12 è mostrata la cumulata delle portate di drenaggio massima e media ogni 300 m di galleria naturale calcolate con le simulazioni SC-2 ed SC-3. Come si può vedere i maggiori incrementi di portata massima si registrano tra le p. 0+300 e 0+700 km in corrispondenza delle

prime due faglie che intercettano la galleria. Un incremento di portata massima più contenuto si registra tra le p. 1+000 e 1+300 km ed è legato alla presenza della terza faglia ed al progressivo aumento della copertura (Fig. 3). Viceversa la cumulata della portata media è caratterizzata da una pendenza quasi costante in entrambe le simulazioni.

4.2. Simulazioni previsionali

Secondo i risultati delle simulazioni previsionali la galleria Col Cavalier, in condizioni idrologiche

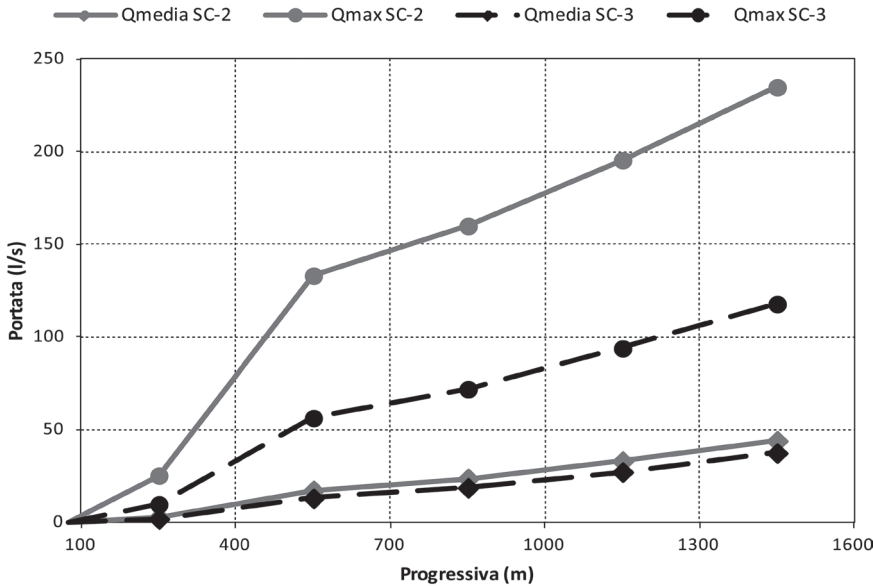


Fig. 12. Portata di drenaggio massima e media cumulata ogni 300 m di galleria naturale calcolata con le simulazioni SC2 e SC3.
Cumulative average and maximum flow rate each 300 m of natural tunnel calculated with SC2 and SC3 simulations.

quanto riguarda la portata media si passa da valori compresi tra 80 e 27 l/s per la galleria naturale a valori tra 31 e 10 l/s per il tratto in artificiale. In generale, a parità di durata dell'evento, una ricarica crescente produce portate di picco maggiori rispetto alla ricarica uniforme, mentre quella uniforme produce portate medie maggiori rispetto alla ricarica variabile. Il confronto tra le portate drenate dal tratto di galleria naturale con quelli in artificiale evidenzia l'azione delle faglie. La presenza di porzioni di ammasso roccioso a maggiore densità di fratturazione nei pressi del tracciato in naturale determina un aumento delle portate sia di picco che medie ed una diminuzione dei tempi di risposta agli eventi di precipitazione rispetto a quanto avviene nei tratti in artificiale.

estreme, può drenare portate di picco comprese tra 383 e 664 l/s in relazione alla modalità, alla durata e all'intensità della precipitazione (Fig. 13). La modalità di distribuzione più sfavorevole è quella crescente, mentre la durata più critica è di 6 ore in entrambe le modalità di distribuzione (Fig. 14a). Valori di portata di picco poco inferiori si raggiungono anche con le simulazioni degli eventi di 3 e 12 ore, mentre la portata media di drenaggio è com-

presa tra 38 e 111 l/s (Fig. 14b), con i valori massimi causati dagli eventi di maggiore durata.

Differenziando i contributi di drenaggio del tratto in galleria naturale da quelli in galleria artificiale si ottengono portate di picco comprese rispettivamente tra 551 e 280 l/s e tra 133 e 53 l/s rispettivamente. Il tratto in naturale raggiunge il picco di portata con un evento di 3-6 ore, mentre per quello in artificiale occorrono eventi di 12-18 ore. Per

5. Conclusioni

La galleria Col Cavalier è un tunnel stradale a singola canna realizzata entro un ammasso roccioso di origine torbiditica (FFB) sul versante sinistro della Valle del Fiume Piave in prossimità di Belluno. Il monitoraggio delle portate di drenaggio sia in corso d'opera che a galleria ultimata conferma che in determinate

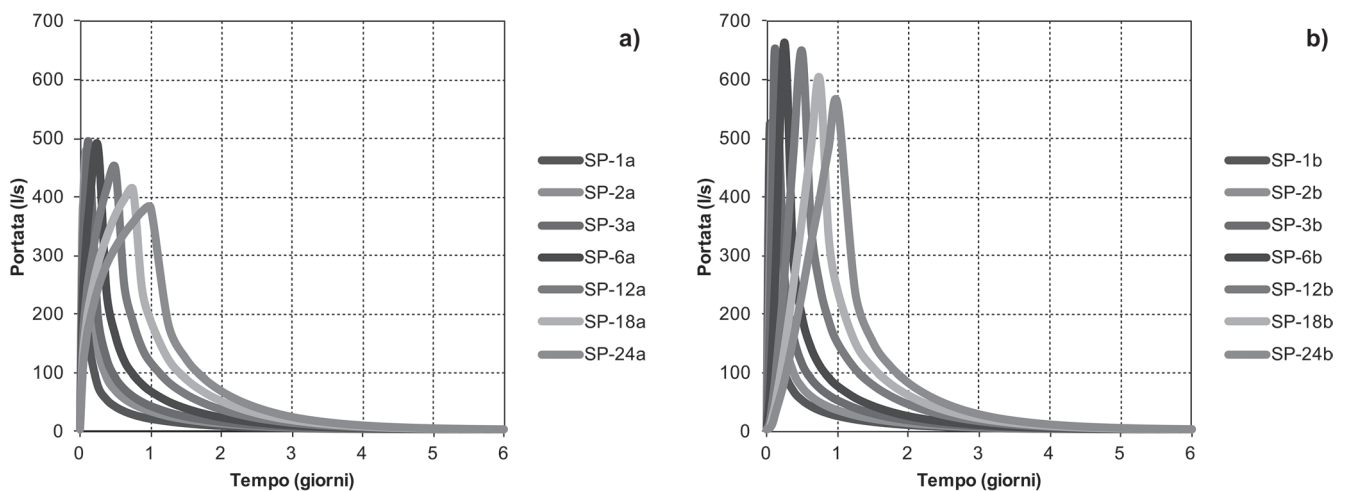


Fig. 13. Risultati delle simulazioni previsionali: idrogramma delle portate drenate dal tratto di galleria indagato; a) simulazioni con ricarica a distribuzione costante e b) simulazioni con ricarica progressivamente crescente.
Prediction simulations results: tunnel drainage flow rates as a function of time; a) constant recharge; b) variable recharge.

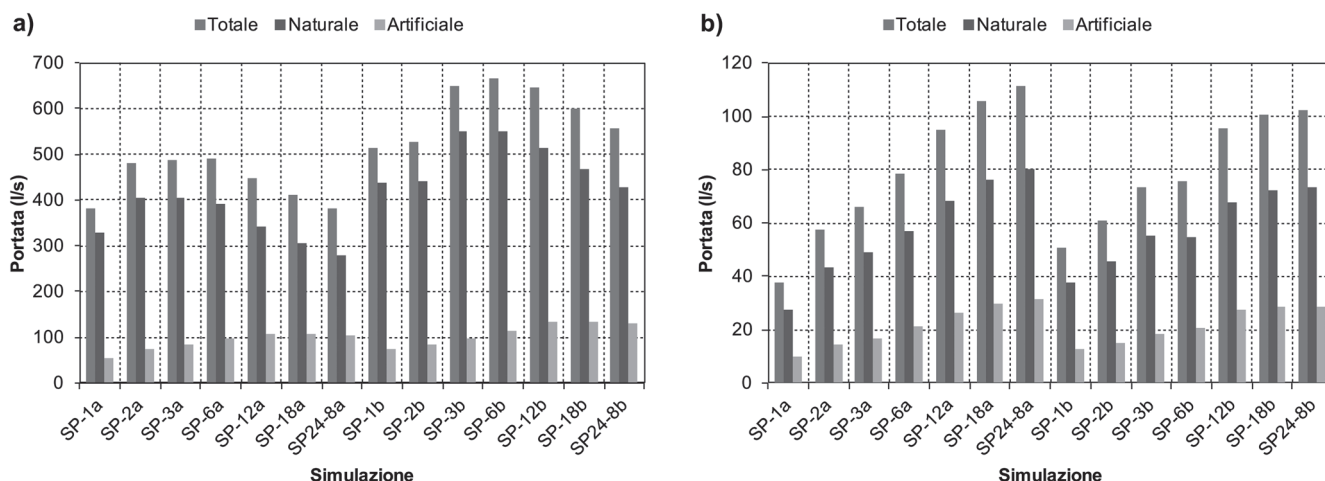


Fig. 14. Risultati delle simulazioni previsionali: portate di picco a) e portate medie b) drenate dalla galleria nelle diverse simulazioni, differenziate per tratto in naturale e tratto in artificiale.

Prediction simulations results: maximum a) and average b) flow rates drained by the tunnel in the different simulations; natural and artificial tunnel parts are distinguished.

condizioni le torbidità possono presentare un comportamento idrodinamico di tipo acquifero. La circolazione idrica è più attiva nelle zone a maggiore densità di fratturazione che di norma accompagnano la presenza di faglie o di lineamenti tettonici, ma che possono essere associate anche alla porzione più superficiale dei versanti, in ragione del detensioneamento e all'alterazione cui sono sottoposti. A causa delle basse coperture e delle presenza di 3 faglie lungo il suo tracciato, la galleria Col Cavalier rappresenta un tipico esempio di circolazione idrica sotterranea entro gli ammassi rocciosi di origine torbiditica; il suo regime di drenaggio è regolato dalle precipitazioni con portate di picco che superano i 200 l/s, nonostante gli effetti di interferenza non abbiano ancora raggiunto lo stato stazionario.

La modellazione EPM si conferma un valido approccio per la simulazione del flusso delle acque sotterranee negli ammassi rocciosi fratturati di origine torbiditica anche a scala di versante riuscendo a riprodurre i dati sperimentali di drenaggio della galleria. Analogamente ad altri esempi di letteratura (Piccinini e Vincenzi, 2010; Piccinini *et al.*, 2012) i valori di conducibilità idraulica assegnati al REV

per le zone a maggiore densità di fratturazione sono di oltre 2 ordini di grandezza maggiori rispetto ai valori sperimentali determinati con i test di permeabilità. Mentre il coefficiente di infiltrazione (CI), stimato attraverso il confronto tra la ricarica applicata nelle simulazioni e la precipitazione misurata e compreso tra 8% ed 8.5%, è in linea con i valori di letteratura disponibili per litologie analoghe. Infine i risultati delle simulazioni previsionali indicano che la galleria Col Cavalier, a seguito di condizioni idrologiche estreme, potrebbe drenare portate di picco comprese tra 380 e 670 l/s in funzione della durata e della distribuzione della precipitazione, confermando come la modellazione numerica del flusso delle acque sotterranee sia un valido supporto alla progettazione delle opere in sotterraneo.

In assenza di una caratterizzazione geomeccanica ed idrogeologica di dettaglio, la semplificazione dell'ammasso roccioso in un mezzo continuo equivalente e la riproduzione di dati idrogeologici sito-specifici (flussi e/o livelli) attraverso la calibrazione, si dimostrano strategie estremamente valide per ottenere previsioni in contesti complessi dal punto di vista idrogeologico.

Bibliografia

- ANAGNOSTOU, G., 1995. The influence of tunnel excavation on the hydraulic head. *Int. J. Numer. Anal. Methods in Geomech.*, 19(10), pp. 725-746.
- ANGELINI, P. e DRAGONI, W., 1997. The problem of modelling limestone springs: the case of Bagnara (North Apennines, Italy). *Ground Water*, 35, pp. 612-618.
- AUTORITÀ DI BACINO DELL'ALTO ADRIATICO, 1996. L. 183/89. Studi finalizzati alla redazione dei piani di bacino - Dimensionamento delle opere idrauliche. Venezia, settembre 1996.
- BEAR, J., 1993. *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*. Ed. Bear J., Tsang C. and De Marsily G., Academic Press, Inc., CA (USA).
- CANUTI, P., ERMINI, L., GARGINI, A., MARTELLI, L., PICCININI, L. e VINCENZI, V., 2009. Le gallerie TAV attraverso l'Appennino toscano: impatto idrogeologico ed opere di mitigazione. Edizioni Edifir Firenze, pp. 207.
- CHISYAKI, T., 1984. A study of confined flow of ground water through a tunnel. *Ground Water*, 22(2), pp. 162-167.
- CMITA, M., 2005. *Idrogeologia applicata e ambientale*. Casa Editrice Ambrosiana, Milano.

- COSTA, V., DOGLIONI, C., GRANDESSO, P., MASETTI, D., PELLEGRINI, G.B. e TRACANELLA, E., 1996. Carta geologica d'Italia alla scala 1:50,000. Note illustrative del F° 063, Belluno. 76 pagg., 16 figg., 1 carta geol., Ist. Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma.
- D'AMBROGI, C. e DOGLIONI, C., 2008. Struttura delle Vette Feltrine. Rendiconti online Soc. Geol. It., 4, pp. 35-40.
- DIERSCH, H.J.G., 2005. FEFLOW finite element subsurface flow and transport simulation system, Reference Manual. WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research, Berlin, Germany, pp. 292.
- DOGLIONI, C., 1987. Tectonics of the Dolomites (Southern Alps, Northern Italy). Jour. of Struct. Geol., 9(2), pp. 181-193.
- EL TANI, M., 2003. Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. Tunn. Undergr. Space Tech., 18(1), pp. 49-55.
- GARGINI, A., PICCININI, L., MARTELLI, L., ROSSELLI, S., BENCINI, A., MESSINA, A., e CANUTI, P., 2006. Idrogeologia delle unità torbiditiche: un modello concettuale derivato dal rilevamento geologico dell'Appennino Tosco-Emiliano e dal monitoraggio ambientale per il tunnel alta velocità ferroviaria Firenze-Bologna. Bollettino della Società Geologica Italiana, 125, pp. 293-327.
- GARGINI, A., VINCENZI, V., PICCININI, L., ZUPPI, G.M. e CANUTI, P., 2008. Groundwater flow systems in turbidites of the Northern Apennines (Italy): natural discharge and high speed railway tunnel drainage. Hydrogeol. J., 16(8), pp. 1577-1599.
- GBUREK, W.J., FOLMAR, G.J. e URBAN, J.B., 1999. Field Data and Ground Water Modeling in a Layered Fractured Aquifer. Ground Water, 37(2), pp. 175-184.
- GOODMAN, R., MOYE, D. e VAN SCHAIKWYK, A.I.J., 1965. Ground water inflows during tunnel driving. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., 2(1), pp. 39-56.
- KANIT, T., FOREST, S., GALLIET, I., MOUNOURY, V. e JEULIN, D., 2003. Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach. International Journal of Solids and Structures, 40, pp. 3647-3679.
- LONG, J.C.S., REMER, J.S., WILSON, C.R. e WITHERSPOON, P.A., 1982. Porous Media Equivalent for Networks of Discontinuous Fractures. Water Resources Research, 18(3), pp. 645-658.
- MOLINERO, J., SAMPER, J. e JUANES R., 2002. Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks. Eng. Geol., 64(4), pp. 369-386.
- PANKOW, J.F., JOHNSON, R.L., HEWETSON, J.P. e CHERRY, J.A., 1986. An evaluation of contaminant migration patterns at two waste disposal sites on fractured porous media in terms of the equivalent porous medium (EPM) model. Journal of Contaminant Hydrology, 1, pp. 65-76.
- PARADIS, D., MARTEL, R., KARANTA, G., LEFEBVRE, R., MICHAUD, Y., THERRIEN, R. e NASTEV, M., 2007. Comparative Study of Methods for WHPA Delineation. Ground Water, 45(2), pp. 158-167.
- PELLEGRINI, G.B., 2000. Note illustrative della carta geomorfologica del F.063 "Belluno" alla scala 1:50.000. Serv. Geol. It., Regione del Veneto, Firenze, 1-141.
- PERROCHET, P., 2005. Confined flow into a tunnel during progressive drilling: an analytical solution. Ground Water, 43(6), pp. 943-946.
- PERROCHET, P. e DEMATTEIS, A., 2007. Modeling transient discharge into a tunnel drilled in a heterogeneous formation. Ground Water, 45(6), pp. 786-790.
- PICCININI, L. e VINCENZI, V., 2010. Impacts of a railway tunnel on the streams baseflow verified by means of numerical modeling. Aqua Mundi, 1(2), pp. 123-134.
- PICCININI, L., GARGINI, A., MARTELLI, L., VINCENZI, V. e DE NARDO, M.T., 2012. Alto Bacino del Fiume Montone. Cartografia idrogeologica per la protezione delle risorse idriche sotterranee nelle unità torbiditiche. Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, Regione Emilia-Romagna, Infocartografica Snc, Piacenza, pp. 119.
- RAYNE, T.W., BRADBURY, K.R. e MULDOON, M.A., 2001. Delineation of Capture Zones for Municipal Wells in Fractured Dolomite, Sturgen Bay, Wisconsin, USA. Hydrogeology Journal, 9, pp. 432-450.
- SCANLON, B.R., MACE, R.E., BARRETT, M.E. e SMITH, B., 2003. Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. Journal of Hydrology, 276, pp. 137-158.
- STEFANI, C. e GRANDESSO, P., 1991. Studio preliminare di due sezioni del Flysch Bellunese. Rend. Soc. Geol. It., 14, pp. 157-162.
- TREFRY, M.G. e MUFFELS, C., 2007. FEFLOW: a finite-element ground water flow and transport modeling tool. Ground Water, 45(5), pp. 525-528.
- VINCENZI, V., GARGINI, A. e GOLDSCHIEDER, N., 2009. Using tracer tests and hydrological observations to evaluate effects of tunnel drainage on groundwater and surface waters in the Northern Apennines (Italy). Hydrogeol. J., 17(1), pp. 135-150.
- VINCENZI, V., PICCININI, L., GARGINI, A. e SAPIGNI, M., 2010. Parametric and numerical modelling tools to forecast hydrogeological impacts of a tunnel. Aqua Mundi, 1(2), pp. 135-154.
- VINCENZI, V., GARGINI, A., GOLDSCHIEDER, N. e PICCININI, L., 2013. Differential Hydrogeological Effects of Draining Tunnels Through the Northern Apennines, Italy. Rock Mechanics and Rock Engineering, DOI 10.1007/s00603-013-0378-7.
- WORTHINGTON, S.R.H., 2009. Diagnostic hydrogeologic characteristics of a karst aquifer (Kentucky, USA). Hydrogeology Journal, 17, pp. 1665-1678.