

Valutazioni idrogeologiche nella fase realizzativa della stazione sotterranea AV di Bologna

Stefano Casale

Laureato in Scienze Geologiche, Università di Bologna, vincitore del Premio di Laurea "Gianfranco Bruzzi" - edizione 2011

1. INTRODUZIONE

La costruzione di imponenti opere ingegneristiche in contesti urbani densamente popolati ha storicamente rappresentato una grande sfida per tutti gli addetti ai lavori, che giornalmente, per anni, affrontano problematiche di qualsiasi tipo, da ingegneristiche a geologiche, da politiche a sociali. La nuova stazione sotterranea AV di Bologna, caratterizzata da un vano sotterraneo di 640 m di lunghezza, 42 m di larghezza e 23 m di profondità, non si esime da questo contesto, rappresentando un'opera complessa, per il contesto geologico-geografico in cui è localizzata, ed allo stesso tempo innovativa, sia per la tipologia delle strutture ingegneristiche utilizzate, come le paratie perimetrali (in quanto costituite da elementi strutturali aventi particolari conformazione e funzionamento statico, quali voltine e speroni), che per la sperimentazione sul campo di nuove tecniche di analisi e studio del sottosuolo (*Refraction Microtremor Technique - Re.M.* e creazione di modelli tridimensionali).

Lo sviluppo di opere di questo genere, caratterizzate da un potenziale d'impatto ambientale elevato, necessita di un'approfondita conoscenza del modello geologico ed idrogeologico locale; per questa ragione le aree interessate sono caratterizzate da una densità di dati geognostici superiore ai settori circostanti, consentendo di effettuare studi stratigrafici ad alta risoluzione delle unità geologiche presenti nel sottosuolo. Grazie a questa disponibilità di stratigrafie di sondaggi e di numerosi piezometri, per questo studio sono stati generati, mediante l'interpolazione delle stratigrafie attraverso il pacchetto software "*Environmental Visualization System by C-TECH*", con l'aiuto di tecnici informatici e geologi, due modelli fisici tridimensionali, uno rappresentativo del solo camerone, l'altro comprendente aree limitrofe. Se il primo, denominato "Camerone", è stato generato per analizzare nel dettaglio l'andamento spaziale e le caratteristiche litostratigrafiche dei corpi geologici presenti, il secondo, definito "Allargato", è stato realizzato ai fini

di una modellazione di flusso idrogeologico avente per obiettivo la valutazione delle interferenze dell'opera sul sistema idrogeologico e la verifica della efficienza delle opere di mitigazione messe in opera (pozzi drenanti). Primo obiettivo di questo lavoro di tesi è la implementazione di un modello numerico di flusso di falda, sia antecedente la costruzione del camerone AV, che successivo, cercando di ricostruire gli effetti che l'opera ha generato sul flusso. In particolare, l'area, modellata con il codice alle differenze finite *Modflow* (interfaccia *GroundWater Vistas*), presenta dimensioni di 96 ha (1200m x 800m) e si estende all'intorno della stazione centrale di Bologna, tra via Pellegrino Tibaldi, via Francesco Zanardi, via Cesare Boldrini e via Giacomo Matteotti; questo dominio spaziale è stato orientato in modo che i limiti al contorno fossero sufficientemente lontani dalle opere per abbracciare un intorno idrogeologicamente significativo (compatibilmente con il numero e la distribuzione dei sondaggi disponibili che hanno consentito di generare il modello fisico tridimensionale "Allargato"). La griglia del modello è basata su 21 sezioni orizzontali (*layers*), ciascuna con spessore 2 m, inserite per poter determinare gli andamenti spaziali dei corpi litologici; l'attribuzione dei valori di K (conducibilità idraulica) è basata su prove *Lefranc* e test di pompaggio effettuati in fase esecutiva. Secondo obiettivo, sempre attraverso la simulazione numerica, è quello di verificare l'effetto del sistema di *bypass* idraulico progettato per la mitigazione dell'effetto barriera esercitato dalle opere in sotterraneo. Di questo sistema, caratterizzato da 50 pozzi verticali, di cui di 25 di presa a monte del camerone della stazione AV e 25 di restituzione a valle, collegati con apposite condotte idrauliche, è stata determinata, con metodo analitico, anche l'efficienza, ovvero la capacità di garantire nel tempo le prestazioni per le quali è stato progettato anche a seguito di una eventuale riduzione della propria funzionalità.

La simulazione numerica mostrata non è realizzata a scopo progettuale, preliminarmente alle opere, ma in

fase di *post operam* serve a verificare gli effetti del progetto e l'efficacia delle opere di mitigazione. Un notevole sforzo è stato dedicato, pertanto, alla ricostruzione geologica del sottosuolo, cercando di adattare, quanto più fedelmente possibile, lo strumento numerico alla realtà fisica.

2. LA NUOVA STAZIONE AV DI BOLOGNA

La realizzazione dell'attraversamento urbano delle linee AV/AC (Alta Velocità/Alta Capacità) a Bologna ha rappresentato l'occasione per riorganizzare l'intero assetto del nodo ferroviario grazie alla costruzione della nuova stazione sotterranea e di importanti opere strutturali, quali i nuovi ponti sul Reno e le gallerie che attraversano la città in sottosuolo per oltre 10 km (Fig. 1). Con l'attivazione dell'attraversamento urbano AV/AC, la città di Bologna sarà dotata di un servizio di mobilità più veloce, più frequente e più affidabile, negli scenari di medio e lungo termine.

La stazione AV di Bologna è stata progettata in maniera tale che il traffico ordinario si sviluppi alla quota dell'attuale stazione, mentre il traffico veloce si svolga quasi interamente in sottosuolo. Questo nuovo assetto consentirà di utilizzare i binari di superficie per potenziare il traffico regionale e metropolitano, migliorando la mobilità senza sottrarre ulteriore spazio alla città in superficie, e di limitare l'impatto ambientale del passaggio dei nuovi treni veloci sulla città (Conforti, 2003).

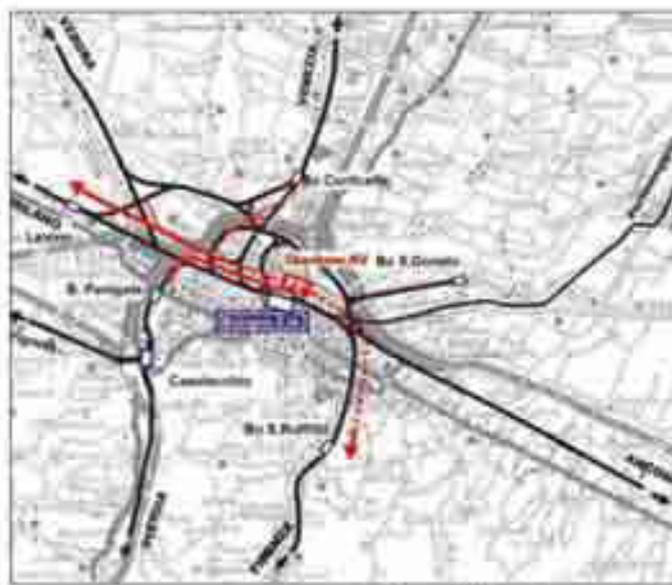


Figura 1 - Attraversamento urbano delle linee AV/AC nel nodo di Bologna (linea rossa). Alle due estremità partono le linee rispettivamente per Milano e Firenze. Il tratteggio indica il tratto in sottosuolo.

La nuova fermata dei treni AV sarà quindi interrata, ma in corrispondenza dell'attuale stazione. In questo modo sarà conservato il vantaggio di avere una stazione in posizione centrale, a ridosso del centro storico, e sarà garantito l'interscambio tra i treni veloci e quelli locali in arrivo o in partenza nella Stazione Centrale.

Ai fine di potenziare il nodo ferroviario, anche la stazione centrale di Bologna sarà oggetto di importanti trasformazioni sotto l'aspetto architettonico e tecnologico. La parte interrata, in calcestruzzo armato e carpenteria metallica, è stata progettata secondo tre livelli così classificati a partire dal più basso: il piano di transito dei convogli AV, il piano *Hall AV*, che ospita i servizi, e il piano di transito veicolare (denominato *Kiss & Ride*) dal quale si accede anche al piano *Park*, situato nei mezzanini sottostanti (Fig. 2).

3. SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA DEL TRACCIATO DELLA LINEA AV DAL PONTE SUL SAVENA (S.RUFFILLO) AL PONTE SUL RENO (S.VIOLA)

La successione litostratigrafica completa dei depositi della pianura bolognese, al di sopra del substrato roccioso, in corrispondenza del tracciato oggetto di studio, comprende, alla base, sedimenti marini con età compresa tra il Tortoniano e il Pleistocene inferiore-medio e, nella parte superiore, sedimenti continentali alluvionali del Pleistocene superiore-Olocene. Il tracciato AV in questione (dal ponte sul Savena al ponte sul Reno) può essere così suddiviso in quattro settori (Italferr, 1997):

- 1) Settore sud orientale estremo: in questo settore l'incisione del T. Savena ha portato in affioramento le formazioni plioceniche e mioceniche del substrato, localmente coperte da deboli spessori di depositi terrazzati limoso-sabbiosi con intercalazioni ghiaiose dello stesso T. Savena;



Figura 2 - Nuova Stazione AV di Bologna - sezione trasversale tipologica

- 2) Settore orientale e sud-orientale: compreso tra il lato orientale del complesso Stazione-Camerone e la dislocazione tettonica pede-appenninica (PTF); è caratterizzato dalla presenza di depositi alluvionali prevalentemente ghiaiosi e/o sabbiosi del conoide del T. Savena;
- 3) Settore centrale: compreso tra il tratto immediatamente ad est del complesso Stazione-Camerone e la fine del tratto in galleria artificiale ad ovest del centro storico; è interessato dalla presenza di potenti depositi limoso-argillosi di interconoide e dei depositi dei conoidi minori (principalmente T. Aposa e T. Ravone), costituiti da terreni sabbiosi, sporadicamente ghiaiosi, e limoso-argillosi, organizzati in corpi lenticolari a modesta continuità laterale. Sono prevalenti intervalli più grossolani in prossimità delle dorsali dei conoidi alluvionali maggiori;
- 4) Settore occidentale: compreso tra la fine del tratto in galleria artificiale ad ovest del centro storico e il T. Lavino; è interessato dalla presenza di depositi alluvionali pleistocenici ed olocenici ascrivibili ai conoidi del T. Lavino (litotipi limoso-argillosi e sabbiosi) e del F. Reno (ghiaioso-sabbiosi con intercalazioni lenticolari limose).

4. CARATTERIZZAZIONE GEOMORFOLOGICA

Il territorio Bolognese comprende tre aree geologicamente e morfologicamente distinte: l'area appenninica, l'area pedeappenninica e collinare e l'area di pianura. La quasi totalità del tracciato AV si sviluppa nell'area di pianura che, dal punto di vista strutturale, rappresenta un bacino subsidente colmato dai materiali alluvionali dei fiumi che vi sfociano, i quali hanno accumulato, sul substrato di argille marine, pile di sedimenti continentali per spessori anche superiori ai 300-400 m (Italferr, 1997). Le aree di alta pianura sono caratterizzate dall'accumulo di materiali detritici grossolani, sotto forma di corpi lenticolari costituenti le conoidi alluvionali pedecollinari. Le intercalazioni argillose e limose presenti sono riconducibili a riempimenti delle aree di interconoide da parte di correnti fluviali a bassa energia di trasporto. Quest'area (Fig.3) è modellata dai due conoidi del F. Reno e del T. Savena, fra i quali si interpongono i conoidi minori del T. Ravone, del Rio Meloncello, del T. Aposa, del T. Grifone (rappresentanti i 4 Sistemi Idromorfologici principali del bolognese) e della Fossa Cavallina (sistema secondario) (Elmi et al., 1984).

5. CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA

Nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola sono state identificate diverse unità idrostratigrafiche, presentate in figura 4 secondo uno schema di comparazione tra la nomenclatura utilizzata nell'ambito della definizione delle unità geologiche riconosciute e la denominazione delle unità idrostratigrafiche proposta più recentemente (Farina et al., 2001b). In primo luogo sono stati individuati tre Gruppi Acquiferi separati da barriere di permeabilità ad estensione regionale. Tali Gruppi sono stati informalmente denominati A, B e C a partire dal piano campagna (Di Dio et al., 1998). Il Gruppo A inoltre è caratterizzato dalla presenza di alcuni strati di ghiaia e sabbia, prevalenti nella pianura pedemontana, dello spessore variabile tra 20 m e 50 m l'uno (sottounità o complessi acquiferi A1, A2, A3, A4), intercalati con livelli di argilla e limo. In particolare, per quanto attiene alle parti più superficiali del Gruppo acquifero, all'interno dell'Unità A1 sono presenti tre corpi ghiaioso-sabbiosi (A1a, A1b e A1c) di cui l'intermedio ed il profondo sono particolarmente rilevanti ed estesi; tali corpi rappresentano acquiferi da liberi (da parzialmente fino a totalmente saturi) a localmente in pressione che si sviluppano a quote molto vicine al piano campagna in corrispondenza dell'alta pianura bolognese. Il tracciato AV nel nodo di

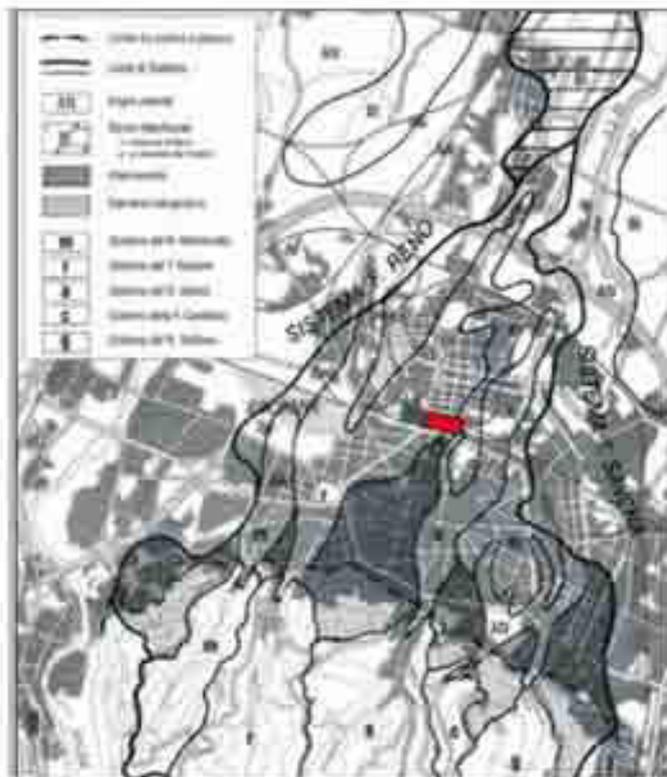


Figura 3 - Sistema idromorfologico di Pedicollina Reno-Savona. È riportata la sua scomposizione in Sistemi di origine gerarchica minore in superficie e la posizione dell'area di studio con un rettangolo rosso (Comune di Bologna, 2002).

Bologna, lungo complessivamente 18 km, di cui oltre 10 km in sotterranea per profondità comprese tra 20 e 40 m dal p.c., si sviluppa nell'unità idrostratigrafica A1, interessando principalmente i corpi ghiaioso-sabbiosi più superficiali (A1c e A1b).

6. MODELLO GEOLITOLOGICO TRIDIMENSIONALE

Per poter parametrizzare e discretizzare il modello numerico di flusso sotterraneo nell'area del camerone della nuova stazione AV di Bologna, è risultato fondamentale l'apporto di restituzioni grafiche tridimensionali dei corpi litologici dell'area oggetto di studio. Questo lavoro si è avvalso dei dati ottenuti dall'indagine geofisica eseguita da Italferr nell'ambito della progettazione della stazione

Sistema Acquifero		Acquifardi	Falda
A	A1	A1c	SUP3-SUP4
		A1b	SUP2
		A1a	SUP1
	A2	Profondo	
A3			
A4			
B		Profondo	
C		Profondo	

Figura 4 - Rappresentazione schematica delle unità litostratigrafiche A, B e C. (Fanna et al., 2001a). La suddivisione dei Gruppi acquiferi (o LIS), degli acquifardi e delle falde è stata effettuata dalla Regione Emilia Romagna, in collaborazione con ENI - AGIP, nel 1999.

Alta Velocità di Bologna durante l'anno 2005 e dell'interpolazione di decine di sondaggi puntuali, effettuati dal 2005 al 2011, mediante apposito software EVS. Entrambe le tecniche di prospezione hanno permesso di costruire un modello litostratigrafico in 3D del sottosuolo fino a 40 m di profondità circa, circa 15 in più rispetto al camerone, ma con differente grado di dettaglio.

6.1 Analisi geofisica ante operam: finalità dell'indagine

Scopo dell'indagine geofisica ante operam è stato quello di costruire un modello litostratigrafico del sottosuolo dell'area di interesse (modello fisico del 2005) mediante una metodologia di indagine indiretta che, unitamente all'integrazione dei dati geognostici acquisiti, consentisse di evidenziare l'andamento geometrico dei livelli litologici costituiti da materiali più grossolani e permeabili presenti nel volume dei terreni interessati dall'opera di intervento. Il modello fisico del 2005 (Fig.5) è stato generato dai tecnici di Italferr nel 2005 e inserito nella relazione tecnica per la fase di Progetto Costruttivo ai fini dello studio idrogeologico dell'acquifero intermedio e superficiale. Per costruire questo modello geolitologico tridimensionale sono stati sfruttati i dati ottenuti da due tecniche di prospezione geofisica del sottosuolo: la Tomografia Elettrica (che si basa sulla misurazione della resistività elettrica dei terreni) e la *Refraction Microtremor Technique* (che utilizza come sorgente di energia i microtremori generati dal rumore di fondo naturale e provocati dal continuo movimento ferroviario).

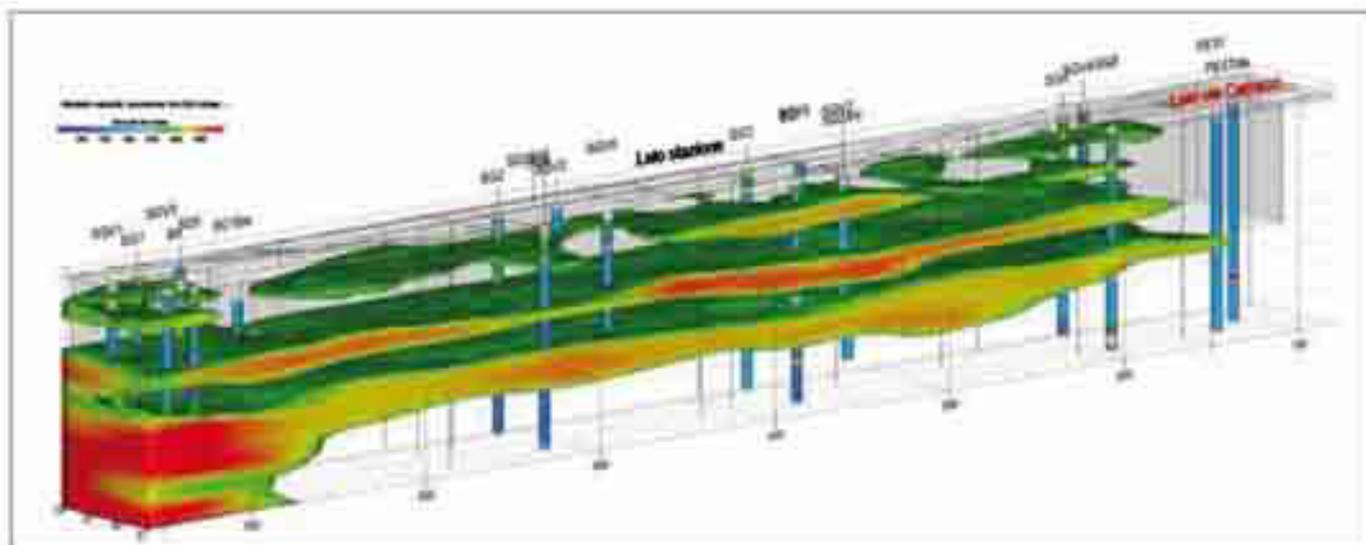


Figura 5 - Modello fisico 3D del 2005. Con verticali blu sono evidenziati alcuni sondaggi presenti al momento della creazione del modello. Maggiore è la velocità, più grossolana sarà la granulometria

6.2 Analisi geofisica post operam: finalità dell'indagine

Nell'arco di tempo trascorso dal 2005 ad oggi, nell'area del camerone della nuova stazione AV di Bologna, il numero dei sondaggi e dei piezometri installati è aumentato notevolmente vista la necessità di procedere con gli scavi e, conseguentemente, di conoscere in maniera più approfondita l'andamento spaziale delle litologie e le oscillazioni dei livelli piezometrici delle falde presenti. L'indagine realizzata ha consentito di evidenziare la posizione e la continuità spaziale dei vari livelli a maggiore permeabilità relativa nell'ambito della ricostruzione idrogeologica dell'area d'intervento. In questa fase, la ricostruzione del modello fisico tridimensionale si è avvalsa di tutte le stratigrafie ottenute dai sondaggi e dai piezometri installati nell'area del camerone e nelle zone limitrofe (relativi al monitoraggio geotecnico e a quello ambientale).

Questo nuovo approccio, basato su interpolazioni spaziali di una fitta rete di sondaggi puntuali, ha consentito di generare due modelli fisici tridimensionali: uno alla scala del camerone, di grande dettaglio, ed uno allargato, comprendente le zone limitrofe, da inserire successivamente in *Modflow* per la creazione del modello numerico di flusso idrogeologico.

6.2.1 Modello fisico tridimensionale del 2011 Camerone

Rispetto alla rappresentazione tridimensionale del 2005, la costruzione del modello fisico dell'area del camerone della stazione AV di Bologna si è avvalsa esclusivamente delle stratigrafie dei sondaggi meccanici generati dal

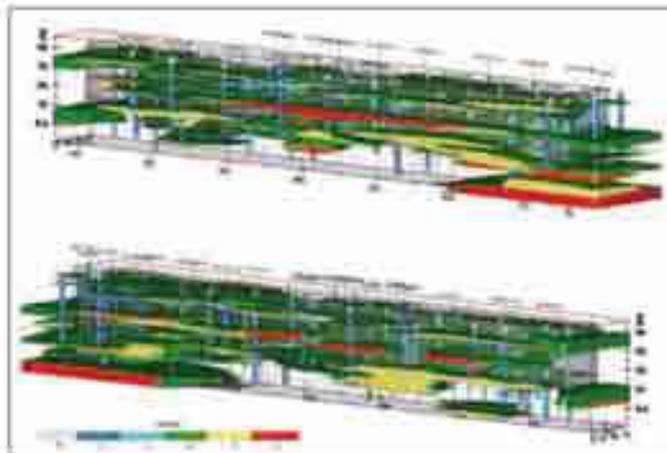


Figura 6 – Modello fisico 3D "Camerone" del 2011. Con verticali blu sono evidenziati i sondaggi utilizzati le cui stratigrafie sono state interpolate per generare il modello.

2005 ad oggi, senza l'apporto della geofisica. Nella fase preliminare della costruzione del modello sono state selezionate le stratigrafie più rappresentative in relazione alla posizione dei sondaggi rispetto al camerone; si è cercato di sfruttare quelli disposti in maniera omogenea rispetto all'area oggetto di studio, addensando le analisi in corrispondenza delle aree caratterizzate da litologie eterogenee e discontinue. Nel caso fossero presenti più sondaggi in un'area molto ristretta, sono stati selezionati solo i sondaggi più profondi, evitando di inserire nel software stratigrafie pressoché uguali. Inoltre sono state effettuate delle ragionate codifiche dei sondaggi al fine di rendere più semplice per il software l'interpolazione degli stessi e la creazione del modello tridimensionale.

Nella figura 6 è rappresentato il modello tridimensionale del camerone della stazione AV di Bologna con viste rispettivamente in corrispondenza del lato dei binari e di via Carracci. In queste rappresentazioni 3D, oltre ai sondaggi utilizzati, sono stati evidenziati solo i corpi litologici più permeabili (come limi sabbiosi, sabbie e ghiaie) per permettere di osservare con maggior chiarezza la geometria dei diversi livelli nelle tre dimensioni.

Analizzando la restituzione stratigrafica del modello "Camerone" sono stati quindi osservati:

- un primo livello compreso tra il piano campagna, circa 42 m s.l.m., e 26 m s.l.m., costituito da alternanze di argille limose e limi argillosi e sabbiosi; a livello idrogeologico è stato caratterizzato come *aquicluda*, vista la predominanza di litotipi a bassa o bassissima permeabilità (limi e argille), anche se nella parte sommitale si possono individuare livelli a maggiore conducibilità idraulica (da media a medio-bassa) caratterizzati da sabbie limose, sedi di una circolazione idrica soprattutto freatica. Nel loro insieme questi livelli costituiscono un *aquitard*;
- un secondo livello, compreso tra i 18 m e i 20 m di profondità dal p.c., tra le quote 26 e 20 m s.l.m., rappresentato in prevalenza da limi sabbiosi e ghiaie in matrice sabbiosa. Questo livello, caratterizzato da una circolazione idrica confinata, costituisce l'acquifero intermedio (il più importante in termini di permeabilità del sito di progetto) oggetto della modellazione di flusso;
- un terzo livello, tra i 20 e i 42 m di profondità dal p.c., tra le quote 20 e 0 m s.l.m., simile al livello superficiale sia per quanto riguarda le caratteristiche litologiche (alternanze di argille limose e limi argillosi e sabbiosi, con intercalazioni di sabbie limose) che quelle idrauliche, caratterizzate da una circolazione confinata nei livelli sabbioso limosi a maggiore permeabilità. Quest'ultimo livello identifica un *aquitard* profondo. Da segnalare, a profondità maggiori di 40 m dal p.c., il corpo

ghiaioso presente in prossimità della testata Firenze, caratterizzato da sviluppo spaziale non trascurabile e dalla evidente continuità: si tratterebbe di un lembo del conoide del T. Savena (il quale si sviluppa nel settore orientale della città di Bologna).

6.2.2 Modello fisico tridimensionale del 2011

Allargato

Il modello tridimensionale allargato è stato costruito ai fini del modello numerico di flusso per ricostruire l'andamento spaziale dei corpi litologici a diverse profondità, in un'area più vasta di quella corrispondente al camerone della stazione AV. Le modalità di generazione di questo modello sono state le stesse applicate per la rappresentazione tridimensionale del solo camerone: oltre alle stratigrafie già note, ne sono state utilizzate alcune ottenute da sondaggi posizionati nelle aree limitrofe. A causa del minor addensamento di questi sondaggi, il grado di dettaglio di questo modello è risultato, nelle aree limitrofe al camerone, inferiore al precedente, ma sufficiente per gli scopi per cui è stato generato.

Viste le elevate dimensioni di questa rappresentazione tridimensionale, non è facile apprezzare con lo stesso

dettaglio dell'area del camerone gli andamenti spaziali di tutti i corpi permeabili; in figura 7 sono mostrate due visuali differenti dei soli corpi ghiaiosi che permettono di apprezzarne lo sviluppo ad una scala più elevata. Si osserva come la concentrazione maggiore di ghiaie si sviluppi proprio tra 20 e 30 m s.l.m. (acquifero intermedio). Durante l'implementazione del modello di flusso sono state generate delle sezioni orizzontali ogni 2 metri da quota 0 a 42 m s.l.m.; queste sezioni sono state inserite in *Modflow* per determinare le dimensioni dei diversi corpi litologici, assegnando le differenti zone di permeabilità in tutta la griglia di lavoro.

7. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI FLUSSO

La nuova stazione sotterranea AV di Bologna genera un effetto "barriera" sul flusso idrogeologico per circa 30 m (da 42 m [p.c.] a 11 m s.l.m. [inizio del tratto filtrato di pozzi di dewatering, posti ad si sotto del tappo di fondo]) e, per questa ragione, è stata prevista la realizzazione di un sistema di *by-pass* idraulico, costituito da pozzi di presa a monte del flusso idrico, e da pozzi di restituzione a valle dello stesso, per la mitigazione dei potenzia-

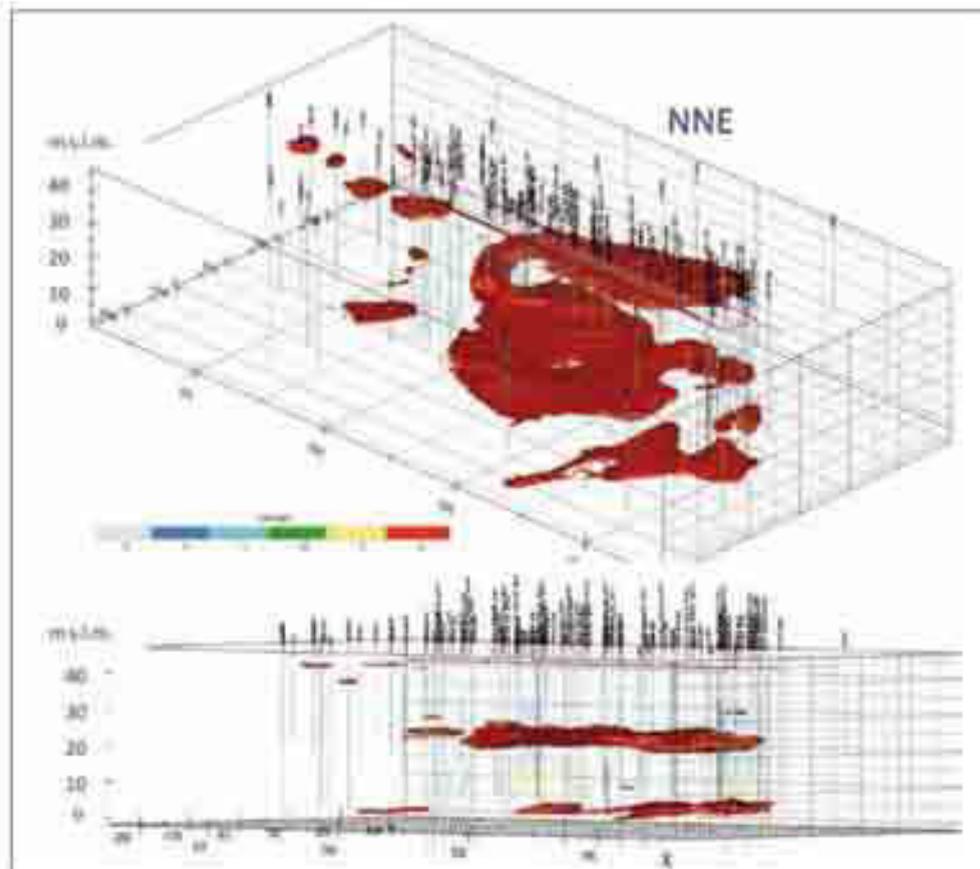


Figura 7 – Modello fisico 3D "Allargato" del 2011 con evidenziati i soli corpi ghiaiosi. Vista da sud-sudest.

li impatti sull'assetto idrodinamico delle acque di falda dell'acquifero intermedio che viene ad essere intercettato dalle opere. Ai fini di verificare gli effetti indotti sulla falda dalle opere interrato e la potenzialità del sistema di *by-pass* idraulico è stata effettuata una modellazione del comportamento delle acque sotterranee nell'acquifero intermedio (il più permeabile dei tre presenti nell'area esaminata) tramite l'impiego di un modello numerico di flusso, utilizzando il codice di calcolo *Modflow 2000* sviluppato dalla USGS (Mc Donald, Harbaugh, 1988) su interfaccia *GroundWater Vistas* (ESI International).

Considerando la complessità litostratigrafica dell'area di interesse si è deciso, ai fini della modellazione numerica del flusso della falda acquifera, di accoppiare i litotipi presenti (rappresentati nel modello litologico tridimensionale con le sigle: A = Argilla e Argilla Limosa, L = Limo e Limo Argilloso, LS = Limo Sabbioso, S = Sabbia e Sabbia Limosa e G = Ghiaia e Sabbia) in tre unità idrogeologiche così distinte nel modello di flusso (Fig. 8):

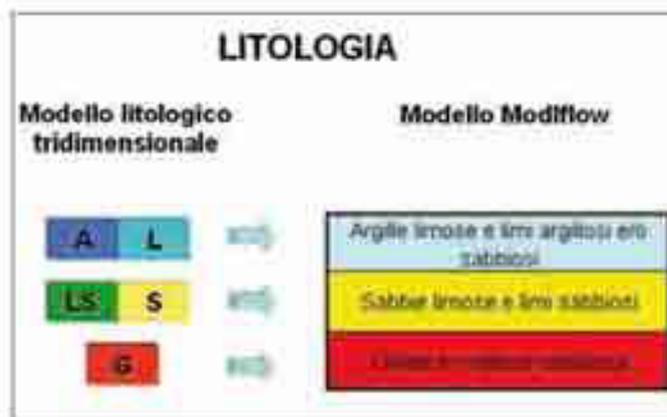


Figura 8 - Corrispondenza tra litotipi del modello litologico tridimensionale e del modello numerico di flusso generato con Modflow, con attribuzione di nuovi colori (azzurro per "Argille limose e limi argillosi", giallo per "Sabbie limose e limi sabbiosi", rosso per "Ghiaie in matrice sabbiosa").

Tra le condizioni al contorno relative al carico e al flusso, nel modello implementato è stato adottato un carico determinato a monte e uno a valle. In entrambi i casi è stata adottata una condizione (di Dirichlet) a carico costante, imponendo che il livello delle due isopiezometriche si mantenesse inalterato anche a seguito di sollecitazioni interne alla falda (effetti barriera delle opere in sottoterraneo, prelievi da pozzi, etc.). Al contrario non sono state definite zone a condizioni di flusso imposto o zone a condizioni di flusso nullo (*No-Flow*) in corrispondenza di formazioni scarsamente permeabili o di aree dove la circolazione idrica è sconosciuta o non è oggetto della presente modellazione, come le aree a sud e a nord dei carichi costanti del dominio di studio e le aree esterne

ad est ed ovest del dominio stesso. Tale scelta è stata dettata in funzione dell'estensione delle opere in sottoterraneo (camerone AV, gallerie policentriche e camerone salesiani): queste si sviluppano fino ai bordi del modello, oltre i limiti delle condizioni di carico idraulico costante, sia ad est che ad ovest. Imporre condizioni di flusso nullo sull'ultima colonna di entrambi i bordi del modello non avrebbe avuto senso e, allo stesso modo, imponendo condizioni di flusso nullo alle colonne subito a ridosso (ad est e ad ovest) dell'ultima cella a carico costante avrebbe limitato la modellazione all'area racchiusa dalle celle *No-flow*, la cui posizione sarebbe comunque stata scelta arbitrariamente con una morfologia che, dovendo comunque consentire di modellare almeno la stazione sotterranea, si sarebbe estesa in modo non supportato da dati piezometrici almeno nel settore orientale, dove la stazione si trova ben oltre le condizioni di carico idraulico costante. Inoltre la direzione del moto di filtrazione, risultando circa ortogonale alle opere in sottoterraneo ed estesa per gran parte del loro tracciato, massimizza gli effetti di sbarramento dovuti alle opere e, conseguentemente, le verifiche d'idoneità del sistema di *by-pass*. Alle formazioni poco permeabili si è preferito assegnare un valore di conducibilità idraulica, anche se basso, valutato sulla base dei risultati di prove di permeabilità eseguite in sito, al fine di riprodurre gli scambi idrici, quando presenti, tra livelli a permeabilità diversa. Il flusso nullo è stato invece assegnato alle celle costituenti le opere in progetto, intese quindi come barriere di permeabilità (Fig. 9).

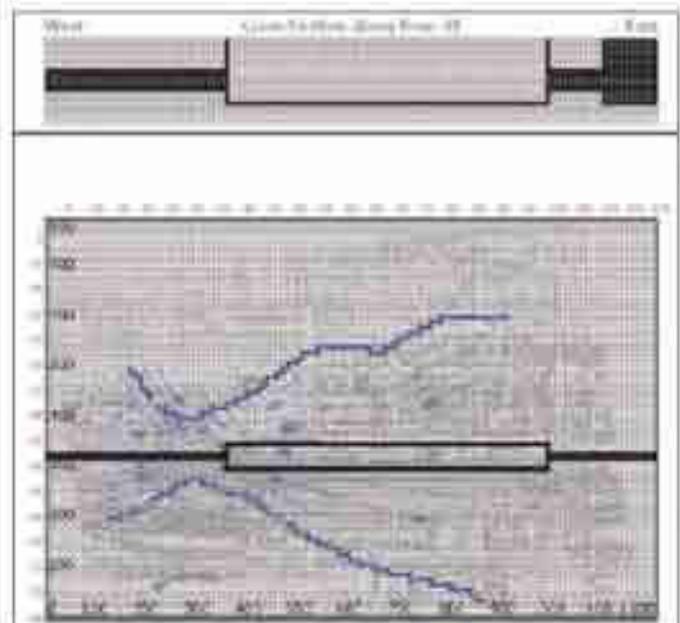


Figura 9 - Schematizzazione nel dominio di studio delle opere in sottoterraneo, in pianta e in sezione (Layer T1, Riga 48), attraverso l'imposizione nel modello di condizioni di flusso nullo (*No-Flow*) alle celle corrispondenti (celle di colore nero).

Le prove *Lefranc* e di portata effettuate nelle diverse fasi di progettazione hanno fornito i valori di conducibilità idraulica K (in m/s) per diverse profondità d'indagine per ogni singolo sondaggio o pozzo analizzato. In questo studio sono state analizzate 46 prove di tipo *Lefranc* a carico variabile e 4 di pompaggio da pozzo; sulla base dei valori di K ottenuti in queste prove sono state assegnate, per ogni tratto esaminato, le litologie definite entro la griglia di *Modflow*, in modo da poter successivamente calcolare un valore medio delle conducibilità idraulica per ciascuna litologia (Fig. 10). Questo valore medio di K sarà poi assegnato omogeneamente, nel modello, a tutta la litologia interessata.

8. VALUTAZIONE DELL'INTERFERENZA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO SULLE ACQUE DI Falda TRAMITE MODELLO NUMERICO DI FLUSSO

8.1 Il modello numerico ante operam

Completata la fase di schematizzazione del modello idrogeologico concettuale del dominio analizzato, si è passati alla fase di verifica del modello di flusso, con l'obiettivo di simulare, in regime stazionario, la struttura piezometrica relativa all'acquifero intermedio registrata nell'area di studio a settembre-ottobre 2007. In particolare è stata scelta questa piezometria perché la meno influenzata dalla costruzione di opere sotterranee (gallerie policentriche nel 2005 e 2006 e camerone AV nel 2008) e la meno irregolare sia dal punto di vista morfologico che a livello di direzione di flusso. Inoltre, dovendo verificare le funzionalità delle opere di *by-pass* in relazione a condizioni idrodinamiche simili a quelle assunte in fase di progetto, e quindi in un momento di pseudo-stazionarietà della falda prima dello scavo della stazione (condizioni *ante operam*), la piezometria del 2007 risultava la più indicata per effettuare la modellazione.

Esaminando l'andamento della piezometria simulata dal modello, si osserva come ricostruisca, con buona

approssimazione, la superficie di falda generata dalle misure di campo (Fig. 11). Le maggiori differenze sono localizzate nell'estremo settore occidentale dell'area, dove le isopiezometriche misurate sono molto ravvicinate ed il gradiente idraulico è elevato, mentre la piezometria simulata dal modello, pur presentando un andamento analogo a quella ricostruita sulla base delle misure piezometriche, risulta meno articolata e c'è mancanza di sovrapposizione; la piezometria modellata pare risentire meno degli effetti del drenaggio generato da opere propedeutiche allo scavo del camerone della stazione AV (microtunnel). Negli altri settori l'andamento delle curve da modello risulta ben approssimato, con massimi scarti nell'ordine del decimetro rispetto alla piezometria misurata con dati di campo.

8.2 Ricostruzione della piezometria a seguito dell'effetto barriera generato dalle opere in sottterraneo; calibrazione del modello post operam

Una volta effettuata la calibrazione *ante operam* sono state schematizzate le opere all'interno del modello, assegnando condizioni di flusso nullo (*No-Flow*) alle celle interessate, procedendo successivamente alla prima ricostruzione della piezometria a seguito dello sbarramento (Figura 12). Confrontando i risultati conseguiti dalla simulazione (isopieze di colore rosso) con la situazione *ante operam* modellata (isopieze di colore blu), si osserva come, nei settori a monte e a valle delle opere, la superficie di falda si porti rispettivamente verso la condizione di carico massimo (35 m s.l.m.) e di carico minimo (30 m s.l.m.) imposta nel modello ai limiti (*boundaries*) settentrionale e meridionale. Tale effetto è maggiormente

Litologia	K (m/s)		
	Valore Minimo	Valore Massimo	Valore medio
Argille limose e limi argillosi e/o sabbiosi	9.07E-09	3.42E-06	9.00E-07
Sabbie limose e limi carbonati	4.19E-05	2.17E-05	1.01E-05
Concretioni calcaree cementate	1.30E-04	1.33E-04	1.31E-04

Figura 10 - Valori minimi, massimi e medi di conducibilità idraulica, ottenuti da prove in sito, relativi alle tre litologie caratterizzanti il modello numerico

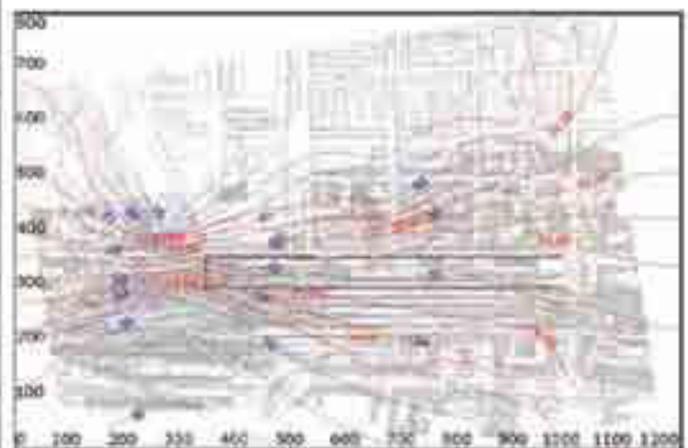


Figura 11 - Piezometria ricostruita con i dati reali misurati in campo (in azzurro) e simulata dal modello (in rosso).

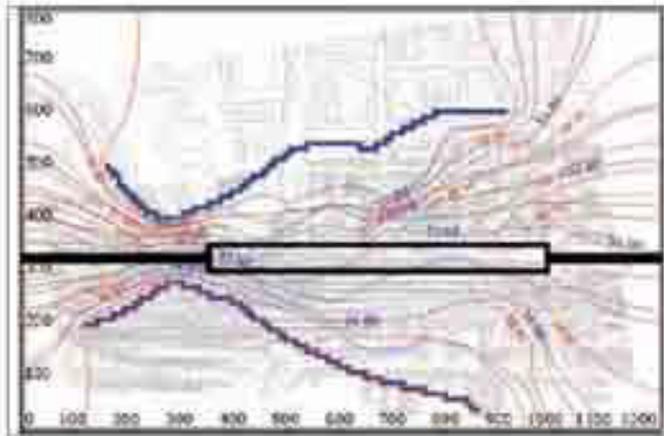


Figura 12 – Ricostruzione della piezometria a seguito dello sbarramento (rosso), confrontata con la piezometria modellata ante operam (in blu).

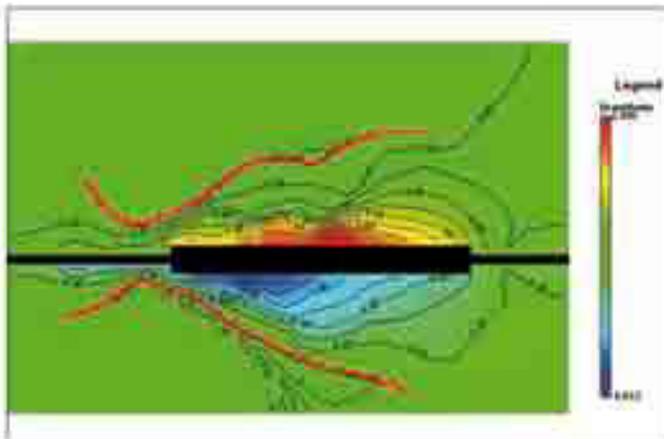


Figura 13 – Effetti complessivi di innalzamento ed abbassamento della falda acquifera a seguito dell'effetto barriera.

te visibile in prossimità delle opere a maggiore sviluppo verticale, come le paratie della stazione sotterranea, ed all'estremo settore orientale della linea ferroviaria in corrispondenza del camerone Salesiani, rispetto alle opere che intercludono parzialmente il flusso nel sottosuolo, come le gallerie localizzate tra la stazione sotterranea e l'estremo settore occidentale della linea ferroviaria.

8.3 Effetti di innalzamento ed abbassamento della superficie di falda

In primo luogo occorre precisare che, avendo posto dei limiti a carico costante a sud e nord del dominio, coincidenti rispettivamente con le isopiezometriche a 35 m s.l.m. (monte) e 30 m s.l.m. (valle) della piezometria misurata, la falda non può abbassarsi o alzarsi oltre questi limiti.; questo implica che sia l'innalzamento che l'abbassamento, in queste zone non coperte dalla modellazione, potrebbero anche essere maggiori rispetto

a quelli calcolati in questo studio. Gli innalzamenti, nel modello, sono rappresentati da valori numerici negativi, trattandosi della differenza tra i valori della piezometrica ricostruita nel modello ante operam e la piezometrica ricostruita dopo aver realizzato le opere, mentre gli abbassamenti sono rappresentati da valori numerici positivi.

Il risultato della simulazione effettuata (Fig. 13) mostra come gli innalzamenti si sviluppino a monte delle opere, con valore massimo raggiunto pari a -1,68 m, localizzato a circa 5 metri di distanza dalle paratie, in corrispondenza del lato occidentale della stazione sotterranea. Queste paratie, interessando una maggiore superficie verticale di mezzo poroso rispetto alle gallerie naturali (32 m contro 12 m), costituiscono un ostacolo maggiore al naturale deflusso della falda, favorendo lo sviluppo degli innalzamenti maggiori.

Gli abbassamenti, al contrario, si manifestano a valle delle opere, con un valore massimo pari a + 2,09 m in corrispondenza della zona centrale della stazione. Anche in questo caso la zona di maggiore impatto si verifica al contatto con le paratie della stazione, in particolare laddove l'acquifero risulta confinato lateralmente da terreni a bassa permeabilità, come si verifica nella parte centrale dell'opera.

8.4 Implementazione del sistema di drenaggio all'interno dell'area modellata

Per ripristinare il più possibile le condizioni ante operam è stato progettato un sistema di pozzi di *by-pass*; questi pozzi sono stati inseriti nel modello *post operam* non per determinarne il dimensionamento ai fini progettuali, ma per verificarne il corretto funzionamento ai fini di ottenere il riequilibrio del livello piezometrico iniziale. Il sistema di *by-pass* idraulico progettato per la mitigazione dell'effetto barriera esercitato dalle opere in sottosuolo è costituito da una prima serie di 25 pozzi verticali (pozzi di presa), posizionati a monte delle opere rispetto alla direzione del flusso idrico, che intercettano le acque circolanti nell'acquifero intermedio inviandole, tramite apposite condotte idrauliche, ad una seconda serie di 25 pozzi verticali (di restituzione) per la loro re-immissione nel medesimo acquifero (Figg. 14 e 15).

Una volta ubicati i pozzi, è stata calcolata la portata media da attribuire a ciascun pozzo necessaria a riequilibrare la piezometrica, attraverso il drenaggio delle acque di monte ed alla loro re-immissione a valle delle opere, riportandola alle condizioni ante operam. A tal fine sono stati determinati i bilanci di massa, in termini



Figura 14 – Ubicazione dei pozzi di by-pass idraulico lungo il camerone AV e loro sequenziale numerazione. Ad ogni pozzo di presa a monte corrisponde un pozzo di restituzione a valle.

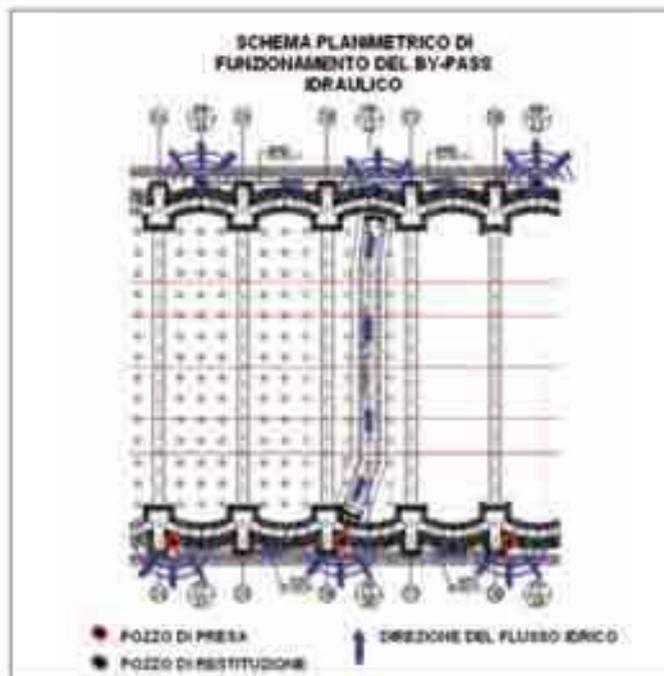


Figura 15 – Dettaglio del funzionamento del sistema di by-pass idraulico: i pozzi di presa (rossi), posizionati a monte flusso, captano il flusso idrico inviandolo, per differenza di carico piezometrico, ai pozzi di restituzione (blu), posizionati a valle, attraverso apposite condotte idrauliche.

di portata di flusso idrico, nelle seguenti condizioni:

- simulazione iniziale *ante operam* con superficie di falda generata sulla base delle sole caratteristiche litologico-stratigrafiche, di conducibilità idraulica e di condizioni di carico idraulico costante (*Constant Head - CH*) a monte e a valle del modello;
- simulazione con implementazione delle opere in sottoterraneo (attraverso l'imposizione di zone a flusso nullo - *No-Flow*) con restituzione della superficie di falda perturbata dall'effetto barriera.

Per bilancio di massa è intesa la sommatoria delle portate relative alle singole voci di bilancio in entrata (*inflow*) ed in uscita (*outflow*) dal modello. Per la leg-

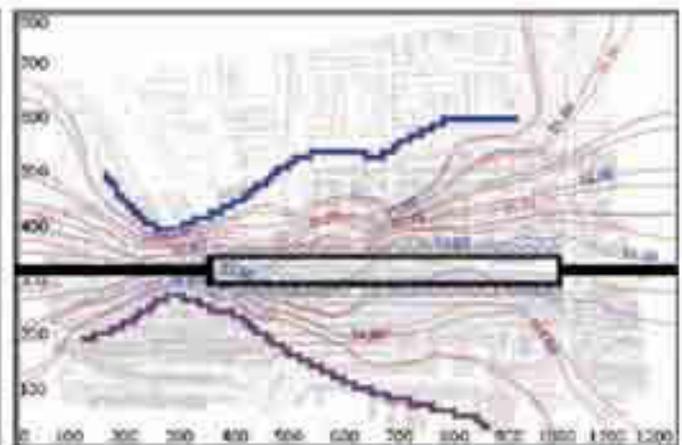


Figura 16 – Ricostruzione della piezometria a seguito dello sbarramento ed attivazione pozzi di by-pass (in rosso). In blu è rappresentata la piezometria *ante operam* ottenuta con la modellazione.

ge di conservazione della massa la sommatoria delle portate delle voci di bilancio in entrata (*inflow*) dovrà essere uguale, a meno di errori legati alla approssimazione del modello, a quella delle voci di bilancio in uscita (*outflow*). Avendo determinato che:

- bilancio di massa *modello senza opere*: 1,920 l/s;
 - bilancio di massa *modello con opere*: 0,975 l/s;
- la differenza tra i due bilanci risulta pari a 0,945 l/s, che corrisponde alla portata complessiva sbarrata dalle opere, quindi alla portata complessiva da garantire ai pozzi di presa (che a sua volta deve essere uguale alla portata complessiva dei pozzi di restituzione). Avendo 25 pozzi per lato, la portata media di ogni singolo pozzo sarà:

$$0,945 \text{ l/s} : 25 \text{ pozzi} = 0,0378 \text{ l/s} = 3,78E-2 \text{ l/s}$$

(poco più di 2 l/min)

Determinata la portata dei singoli pozzi è stata rigenerata la piezometria del modello con le opere sotterranee e i pozzi di by-pass attivi ed è stata confrontata con la medesima superficie ottenuta per il modello *ante operam* (Fig. 16).

Per evidenziare le differenze presenti tra queste due superfici sono state generate le isolinee di abbassamento e innalzamento residuo, calcolate come differenza tra la quota della superficie piezometrica del modello *ante operam* e quella del modello *post operam* con pozzi di *by-pass* attivi. I primi risultati hanno però mostrato differenze con valori residui (di abbassamento o innalzamento) anche superiori al metro; queste differenze sono state generate dall'aver impostato un valore della portata di riequilibrio costante per tutti i pozzi, indipendentemente dalle caratteristiche di permeabilità del mezzo poroso filtrato dal singolo pozzo. Per questa ragione è stato necessario procedere ad una operazione di calibrazione delle portate di ogni pozzo, eseguendo una serie di iterazioni successive (metodo *trial & error*) al fine di ottenere una situazione finale di riequilibrio della superficie di falda soddisfacente. Dopo aver regolato le portate dei pozzi, sono stati ottenuti innalzamenti massimi residui di 67 cm a monte delle gallerie naturali, nel settore occidentale della stazione, a distanza di 5 m dall'estradosso delle opere, e abbassamenti massimi residui di 68 cm, alla stessa distanza a valle delle gallerie naturali lato ovest della stazione. Questi effetti residui diminuiscono repentinamente allontanandosi dalle opere fino ad annullarsi già ad una distanza di 50-60 metri dall'estradosso delle paratie della stazione e ad un centinaio di metri dalle gallerie naturali nel settore occidentale della stazione (Fig. 17). Al momento di stesura di questa tesi non è stato possibile effettuare una verifica con la piezometria reale *post operam* o con le effettive portate dei pozzi in quanto l'opera è tutt'ora in fase di completamento.

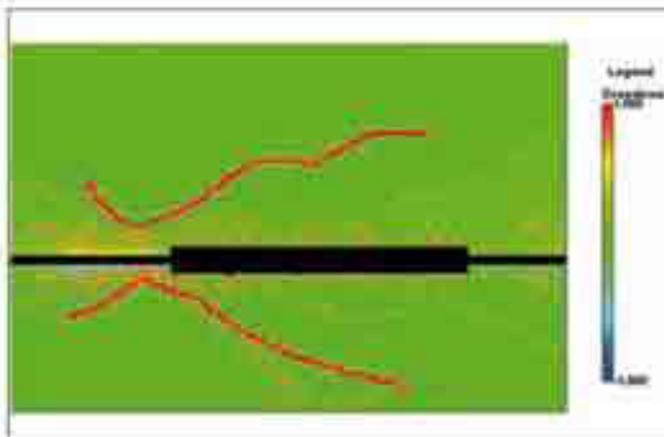


Figura 17 – Effetti complessivi finali di innalzamento ed abbassamento della superficie piezometrica dell'acquifero intermedio (rispetto alla superficie piezometrica *ante-operam*) a seguito dell'effetto barriera e con pozzi di *by-pass* attivi.

8.5 Verifica con metodo analitico dell'efficienza del sistema di *by-pass* idraulico

Nella progettazione di un sistema di *by-pass* idraulico è necessario valutare l'efficienza del sistema, ovvero la capacità di garantire nel tempo le prestazioni per le quali è stato progettato, anche a seguito di una riduzione della propria funzionalità. Questa verifica ha caratterizzato l'ultima fase della modellazione.

Un parametro che può essere indicativo, dal punto di vista fisico, della capacità del sistema di assolvere in modo efficace alle funzioni per le quali è stato progettato, è rappresentato, secondo i progettisti Italferr, dalla capacità aggiuntiva, rispetto a quella minima necessaria, che il sistema è in grado di offrire. Tale parametro si può definire come capacità drenante residua CR del sistema di *by-pass* idraulico, calcolata come percentuale della differenza tra la portata massima che il sistema è in grado di smaltire e la portata minima che il sistema deve smaltire per raggiungere condizioni di equilibrio idrodinamico soddisfacenti, ovvero sufficientemente vicine a quelle originarie, rapportata alla portata massima:

$$C_n = (Q_{max} - Q_{min}) / Q_{max} = 1 - Q_{min} / Q_{max} \quad [%]$$

con:

- C_n = capacità drenante residua del sistema di *by-pass* idraulico ($0\% \leq C_n < 100\%$);
- Q_{min} = portata minima da smaltire per raggiungere le condizioni di equilibrio idrodinamico;
- Q_{max} = portata massima che il sistema è in grado di smaltire.

Un sistema si può ritenere molto efficiente per C_n prossimo al 100% e poco efficiente per C_n vicino allo zero. Un sistema efficiente sarà quindi in grado di sopportare una riduzione della sua capacità massima di smaltimento delle acque, come nel caso di una riduzione della permeabilità dei dreni, garantendo comunque lo smaltimento delle portate intercettate. La portata minima che il sistema deve essere in grado di smaltire è quella sbarrata dalle opere, che è stata calcolata con le simulazioni numeriche (o anche che può essere calcolata con metodo analitico). In quest'ultimo caso (metodo analitico) il valore della portata sbarrata può essere ricavata applicando la legge di Darcy:

$$Q = K \cdot i \cdot A$$

dove:

- K = conducibilità idraulica dell'acquifero [m/s]
- i = gradiente idraulico [-]

A = area delle sezioni di flusso sbarrate dalle opere [m²], tenendo conto del contributo delle singole tratte d'opera (gallerie naturali, stazione sotterranea, camerone Sale-siani) (Figg.18 e 19).

Le portate intercettate sono state così calcolate:

$Q = \sum Q_i = Q1+Q2+Q3+Q4$ (Sono state considerate 4 Q, una per ogni sezione di sbarramento delle 4 opere sotterranee coinvolte nella modellazione [2 gallerie naturali, il camerone AV e il camerone Salesiani])

dove:

$$Q_i = \sum K_j \cdot A_j \cdot i = (K_{LA} \cdot A_{LA} + K_{LS} \cdot A_{LS} + K_{LG} \cdot A_{LG}) \cdot i$$

dove:

- K_{LA} , K_{LS} , K_{LG} = Coefficienti di permeabilità rispettivamente di Limi argillosi e Argille limose (A_{LA}), Sabbie limose e Limi sabbiosi (A_{LS}) e Ghiaie (A_{LG});
- A_{LA} , A_{LS} , A_{LG} = Area delle sezioni interessate da Limi argillosi e Argille limose (A_{LA}), Sabbie limose e Limi sabbiosi (A_{LS}) e Ghiaie (A_{LG})

Il risultato del calcolo, con metodo analitico (Fig. 20), delle portate complessive sbarrate dalle opere in sottoterraneo, fornisce un valore di 0,934 l/s molto vicino al risultato di 0,945 l/s ottenuto con il modello numerico di flusso.

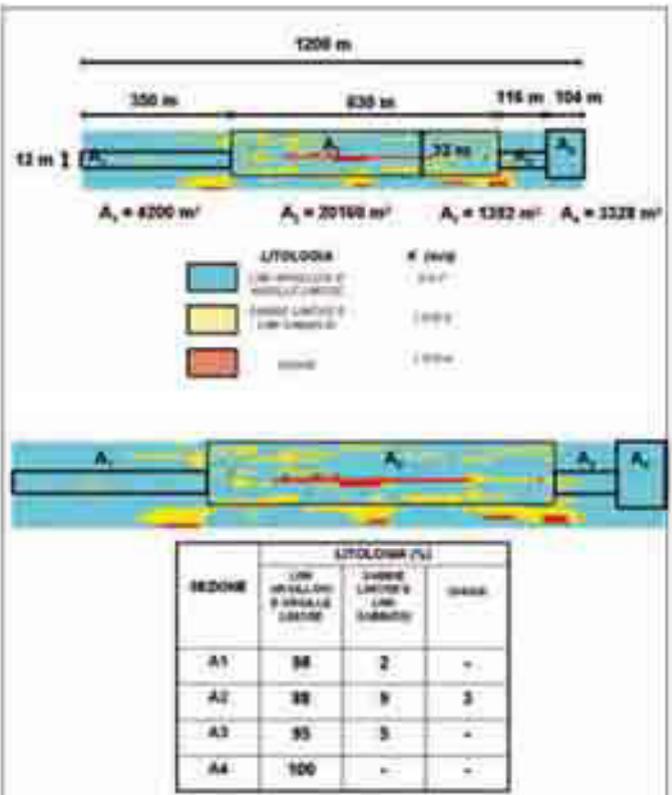


Figura 19 – Valori delle grandezze considerate nel calcolo delle portate intercettate dalle opere in sottoterraneo. Immagini tratte da Modflow modificate con l'aggiunta delle dimensioni delle superfici di sbarramento e delle litologie presenti (in percentuale).

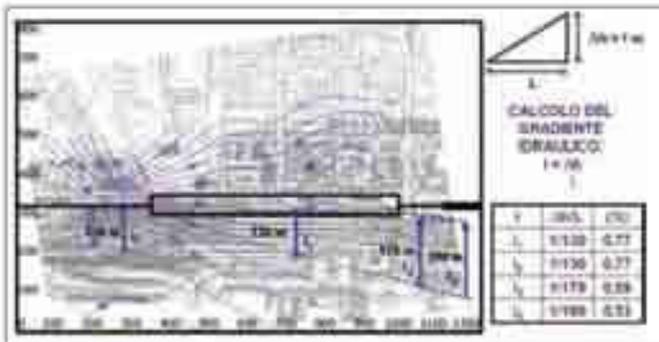


Figura 15 – Determinazione dei gradienti idraulici (in direzione ortogonale alla barriera) per il calcolo delle portate intercettate dalle opere sotterranee.

SEZIONE	AREA (m ²)	% LITOTIPO			AREA LITOTIPO (m ²)			K (m/s)			i (%)	Q (l/s)
		LA	SL	G	A _{LA}	A _{LS}	A _{LG}	K _{LA}	K _{LS}	K _{LG}		
A ₁	4200	98%	2%	0%	4116	84	0	9.00E-07	1.01E-05	1.31E-04	0.77%	0.04
A ₂	20160	88%	9%	3%	17740.8	1814.4	604.8	9.00E-07	1.01E-05	1.31E-04	0.77%	0.87
A ₃	1392	96%	4%	0%	1336.32	55.68	0	9.00E-07	1.01E-05	1.31E-04	0.59%	0.01
A ₄	3328	100%	0%	0%	3328	0	0	9.00E-07	1.01E-05	1.31E-04	0.53%	0.02
PORTATA COMPLESSIVA Q (l/s) =											0.934	

Figura 20 – Valori delle portate intercettate dalle singole tratte d'opere, calcolate con metodo analitico, e risultato complessivo.

Affinché il sistema garantisca la continuità del flusso idraulico ed il ripristino delle condizioni idrodinamiche *ante operam*, i pozzi di *by-pass* devono essere in grado di smaltire almeno tale valore di portata (Fig. 21), ovvero dovrà essere rispettata la seguente relazione:

$$Q_{\text{INTERCETTATA}} \leq Q_{\text{POZZI DRENANTI}} = K_{\text{DRENO}} \cdot i \cdot A_{\text{AREA TOTALE SEZIONE FILTRANTE}}$$

dove:

- i = valore del gradiente idraulico delle condizioni *ante operam* (in quanto il sistema di *by-pass* deve garantire il ripristino delle condizioni *ante operam* ottenendo quindi un valore di gradiente idraulico coerente con queste);
- K_{DRENO} = coefficiente di permeabilità del dreno;
- $A_{\text{AREA SEZIONE TOTALE FILTRANTE}}$ = area della sezione filtrante totale di progetto.

Il valore del gradiente idraulico da utilizzare nei calcoli può essere ricavato come media aritmetica dei valori dei carichi idraulici adottati per ciascuna tratta, pesata sulla lunghezza delle singole tratte, ovvero:

$$i = \sum_k (i_k \cdot L_k) / \sum_k L_k \quad (k = 1, 2, 3, 4)$$

dove:

- $i_1 = 0.77\%$, $L_1 = 350$ m;
- $i_2 = 0.77\%$, $L_2 = 630$ m;
- $i_3 = 0.59\%$, $L_3 = 116$ m;
- $i_4 = 0.53\%$, $L_4 = 104$ m;

da cui: $i_{\text{MEDI}} = 0.73\%$

- $K_{\text{DRENO}} = 5E-4$ m/s;

• $A_{\text{AREA SEZIONE TOTALE FILTRANTE}} =$
 = area sezione filtrante del singolo pozzo * n° pozzi =
 = altezza tratto filtrante * diametro pozzo * n° pozzi =
 = 8 m * 0.8 m * 25 = 160 m²

Il valore della portata massima che può essere smaltita dal sistema di *by-pass* sarà quindi pari a:

$$Q_{\text{MAX}} = Q_{\text{POZZI DRENANTI}} = K_{\text{DRENO}} \cdot i \cdot A_{\text{AREA TOTALE SEZIONE FILTRANTE}} =$$

$$= (5E-4 \cdot 0.73\% \cdot 160) \text{ m}^3/\text{s} = 0.0584 \text{ m}^3/\text{s} = 58.4 \text{ l/s.}$$

Il valore della capacità drenante residua sarà allora:

$$C_{\text{R}} = 1 - Q_{\text{MAX}} / Q_{\text{MAX}} = 1 - 0.934 / 58.4 = 0.98 = 98\%.$$

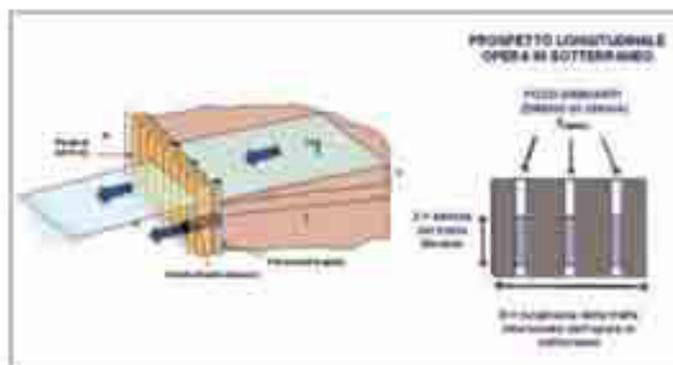


Figura 21 – Condizione necessaria a garantire la continuità originaria del flusso idraulico attraverso il sistema di *by-pass*

Il risultato ottenuto mostra che il sistema di *by-pass* idraulico di progetto è molto efficiente in quanto capace di garantire la continuità idraulica da un lato all'altro della barriera anche nel caso di una diminuzione della propria funzionalità, come può avvenire a causa di una riduzione nel tempo della permeabilità del dreno (dovuta a fenomeni di trasporto in sospensione nel mezzo fluido e successiva deposizione di particelle fini all'interno nel dreno) oppure per un aumento delle portate intercettate, generate da precipitazioni meteoriche particolarmente intense.

Anche se la permeabilità del dreno si riducesse nel tempo di un ordine di grandezza, il valore della capacità drenante residua sarebbe ancora molto elevato, come risulta dai seguenti calcoli:

$$C_{\text{R}} = 1 - Q_{\text{MAX}} / Q_{\text{MAX}} = 1 - 0.934 / 5.84 = 0.84 = 84\%,$$

dove:

$$Q_{\text{MAX}} = Q_{\text{POZZI DRENANTI}} = K_{\text{DRENO}} \cdot i \cdot A_{\text{AREA TOTALE SEZIONE FILTRANTE}} =$$

$$= (5E-5 \cdot 0.73\% \cdot 160) \text{ m}^3/\text{s} = 0.00584 \text{ m}^3/\text{s} = 5.84 \text{ l/s.}$$

8. CONCLUSIONI

La costruzione della stazione sotterranea AV di Bologna, che è un'opera di notevole complessità, sia per le caratteristiche proprie dell'opera sia per il contesto urbano in cui viene realizzata nonché per l'elevata variabilità litologica e spaziale dei corpi geologici presenti, consentirà di trasferire il traffico ferroviario a media e lunga percorrenza su nuove linee veloci, permettendo il decongestionamento delle linee esistenti, destinate al potenziamento del trasporto passeggeri e merci a carattere metropolitano, regionale ed interregionale (Italferr, 1997). Durante l'esecuzione dei tiranti nelle fasi iniziali delle lavorazioni sono state registrate alcune lesioni su edifici situati in via Caracci, presumibilmente anche per il drenaggio delle lenti sabbiose dell'acquifero superficiale, temendo, da parte dell'opinione pubblica, che si sarebbero potuti sviluppare effetti negativi anche sulle falde più profonde. Infatti, mentre i livelli permeabili più profondi sono interessati marginalmente dalle opere, il livello intermedio viene, per tutta la lunghezza della stazione (circa 640 m) completamente sbarrato. Per questa ragione, nel presente studio, è stato simulato, tramite appositi codici di calcolo, il flusso di falda sotterranea. In particolare, la simulazione del flusso sotterraneo in corrispondenza di opere ingegneristiche di questa portata, rappresenta l'unico approccio per la previsione e quantificazione delle perturbazioni apportate al sistema idrogeologico locale e della funzionalità di opere di mitigazione necessarie per minimizzare questi cambiamenti, ricreando una si-

tuazione il più simile possibile a quella *ante operam*. In questo lavoro di tesi è stato eseguito uno studio integrato, geologico ed idrogeologico, su depositi alluvionali di età quaternaria nella fascia di alta pianura adiacente al margine meridionale del Bacino Padano, compresa tra i sistemi idrografici del Fiume Reno e del Torrente Savena, in corrispondenza della nuova stazione AV di Bologna. Questo studio è stato finalizzato alla costruzione di due modelli geolitologici tridimensionali della zona del camerone AV e alla generazione di un modello di flusso di falda per determinare l'influenza dell'opera sotterranea e il corretto funzionamento del sistema di progettato, necessario a riequilibrare i livelli piezometrici a monte e a valle della nuova stazione. Al fine di determinare la geologia di superficie dell'area esaminata, è stata analizzata la storia recente di formazione dei depositi quaternari attraverso informazioni bibliografiche, è stata consultata la Carta geologica della Regione Emilia-Romagna per caratterizzare i sedimenti presenti e sono state analizzate le stratigrafie ottenute da molte decine di carotaggi distribuiti su tutta l'area oggetto di studio eseguiti dal 2005 ad oggi per lo sviluppo progettuale e delle lavorazioni. Questi dati sono stati poi correlati ed interpolati attraverso l'utilizzo del pacchetto software "Environmental Visualization System" (C-TECH), che lavora su tecniche di cross correlazione in tre dimensioni. L'interpolazione di questi dati ha consentito di generare due modelli tridimensionali, uno denominato "Camerone", per poter analizzare in dettaglio le caratteristiche litostratigrafiche del camerone della stazione fino ad una profondità di circa 40 m, l'altro definito "Allargato", il quale copre un'area molto maggiore rispetto a quella del solo camerone ed è stato creato principalmente ai fini dell'implementazione del modello numerico di flusso per determinare l'andamento spaziale dei diversi corpi litologici presenti e, di conseguenza, la distribuzione delle loro permeabilità. Per entrambe le restituzioni 3D sono state effettuate delle sezioni, sia trasversali che longitudinali che orizzontali, per poter analizzare la distribuzione spaziale dei vari livelli litologici da diversi punti di vista e, soprattutto per l'"Allargato", per poterle successivamente inserire nella griglia del modello numerico di flusso. L'esistenza di uno studio realizzato da Italferr nell'area cantieri TAV, utilizzando indagini geofisiche quali tomografie elettriche e sondaggi sismici con metodo Re.Mi., ha consentito di confrontare il diverso grado di dettaglio delle geometrie dei corpi sedimentari ricostruiti sulla base dei dati di sondaggio ("Camerone" ed "Allargato") e di quelle generate grazie al solo apporto della geofisica, mostrando una buona corrispondenza tra i corpi litologici, anche se quelli ottenuti dai dati di sondaggio

forniscono informazioni più dettagliate ed affidabili, soprattutto in profondità, sia ai fini di un'analisi litostratigrafica che per una modellazione numerica di flusso. Inoltre, allo scopo di verificare la funzionalità del sistema di *by-pass* idraulico previsto in progetto per la mitigazione del potenziale impatto idrogeologico della nuova stazione AV e delle altre opere del passante in sotterraneo in corso di realizzazione a Bologna, è stata eseguita una modellazione numerica del flusso delle acque di falda circolanti nel sottosuolo. L'analisi numerica, effettuata tramite codice numerico alle differenze finite *Modflow* con interfaccia *GroundWater Vistas*, ha compreso, oltre alla ricostruzione di un modello 3D del sottosuolo generato con software EVS:

- la assegnazione dei parametri idrogeologici e la definizione delle condizioni al contorno e simulazione della piezometria in assenza di opere;
- l'implementazione delle opere sotterranee e la nuova ricostruzione del flusso idrico valutando gli effetti di disturbo generati dall'inserimento di queste barriere;
- l'inserimento dei pozzi di *by-pass* idraulico previsti in progetto (di drenaggio a monte e di restituzione a valle, per gravità, senza armamento) e la simulazione della piezometria dopo l'attivazione del sistema di *by-pass*, valutando gli effetti di disturbo residui.

Nel caso della simulazione della sola barriera costituita dalle opere in sotterraneo, sono stati osservati un innalzamento residuo massimo di 1,68 m, registrato a monte a 5 metri di distanza dalle paratie, in corrispondenza del lato occidentale della stazione sotterranea, e un abbassamento residuo massimo di 2,09 m, registrato a valle a 5 metri di distanza dalle paratie in corrispondenza della zona centrale della stazione. Nel caso, invece, di simulazione della barriera e dei pozzi di *by-pass* attivi, sono stati registrati un innalzamento residuo massimo di 0,67 m, registrato a monte a 5 metri di distanza dall'estradosso delle gallerie naturali lato ovest della stazione sotterranea, e un abbassamento residuo massimo di 0,68 m, registrato a valle a 5 metri dall'estradosso delle gallerie naturali lato ovest della stazione.

Infine è stata condotta una verifica, con metodo analitico, della funzionalità del sistema di *by-pass* idraulico, attraverso la determinazione della capacità drenante residua (C_d), intesa come capacità del sistema di garantire la continuità idraulica da un lato all'altro della barriera, anche nel caso di una riduzione nel tempo della permeabilità del dreno o per un aumento delle portate intercettate. Quest'analisi ha messo in evidenza come il sistema di *by-pass* risulti molto efficiente, ovvero in grado di smaltire le portate intercettate anche nel caso di una riduzione di un ordine di grandezza della permeabilità del dreno.

In conclusione, nonostante la complessità dell'andamento litostratigrafico, l'impossibilità di avere un numero di sondaggi tale da permettere la ricostruzione di un modello "Allargato" con lo stesso grado di dettaglio di quello relativo al camerone della stazione AV (per il quale erano state utilizzate oltre 200 verticali di indagine) e il possibile sovradimensionamento dei valori di conducibilità idraulica dei litotipi meno permeabili ottenuti dalle prove *Lefranc* (anche se nel modello sono stati inseriti valori di K ritenuti accettabili poiché mediati tra diverse prove), i risultati ottenuti con la modellazione numerica e con le verifiche analitiche sono risultati positivi, avendo mostrato la correttezza delle impostazioni progettuali e la idoneità di un sistema di *by-pass* idraulico, costituito da pozzi, come opera di mitigazione dell'impatto idrogeologico dovuto all'effetto barriera, quale è quello progettato per la nuova stazione sotterranea AV di Bologna.

9. BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

AMOROSI A. & FARINA M., (1994b). *Sequenze deposizionali nei depositi alluvionali quaternari del primo sottosuolo nell'area ad est di Bologna, tra il T. Savena e il T. Idice*. 1st European Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems, Bologna, June 13-16, 1994, Vol. 5, pp. 35-54.

AMOROSI A., FARINA M., SEVERI P., PRETI D., CAPORALE L. & DI DIO G., (1996a). *Genetically related alluvial deposits across active fault zone: an example of alluvial fan-terrace correlation from the upper Quaternary succession of the Po Basin in the Bologna area (northern Italy)*. *Sedimentary Geology* 102, 275-295.

ARPA Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna. (2005). *Le caratteristiche degli acquiferi della regione Emilia-Romagna. Report 2003*. A cura di A. Fava, M. Farina, M. Marcaccio, pp. 242.

CASTELLARIN A., EVA C. & CAPOZZI R., (1994). *Tomografie sismiche e interpretazione geologica profonda dell'Appennino Settentrionale Nordoccidentale*. *Studi Geologici Camerti*, Vol. Spec. (1992/2), 85-98.

COMUNE DI BOLOGNA. (2001). *Piano comunale delle attività estrattive (PAE): Relazione Geologica ed Idrogeologica*. Versione Controdedotta.

CONFORTI V., (2003). *Il nodo di Bologna come esempio di integrazione nell'ambito del sistema ferroviario*. Report inedito per conto delle Ferrovie dello Stato s.p.a.

CREMONINI G. & RICCI LUCCHI F., (1982). *Guida alla geologia del margine appenninico-padano*. *Guide geol. reg. S.G.I.*, 247 p.

ELMI C., BERGONZONI A., MASSA C. & MONTALETTI V., (1984). *Il territorio di pianura del comune di Bologna: aspetti geologici e geotecnici*. *Giornale di Geologia*, 46 (2), 127-152.

FARINA M., SIMONI M. & PASSUTI L., (1998). *Il complesso idrogeologico superficiale nel contesto della città di Bologna*. *Il Geologo dell'Emilia Romagna*, 11, 4-14.

FRANCAVILLA F., COLOMBETTI A., (1980). *Lineamenti idrogeologici della pianura della provincia di Bologna*. C.N.R., Quaderni dell'Istituto sulle Acque 51(1), 120-143.

FRANCAVILLA F., D'ONOFRIO S. & TONI G., (1980). *Caratteri idrogeologici, strutturali e paleoecologico-stratigrafici del conoide del Fiume Reno (Bologna)*. *Quaderni Ist. Ric. Acque CNR*, 51-1, 81-95.

ITALFERR, (1997). *Linea ferroviaria Milano - Napoli. Nuova Stazione centrale di Bologna. Relazione geologica e idrogeologica*. A cura di Rinaldo Genevois, Report inedito per conto delle Ferrovie dello Stato s.p.a.

ITALFERR, (2001). *Tutela, mitigazione e monitoraggio ambientale delle acque sotterranee*. Report inedito per conto delle Ferrovie dello Stato s.p.a.

ITALFERR, (2005). *Studio idrogeologico dell'acquifero superficiale e modello Geolitologico tridimensionale. Relazione Tecnica*. Report inedito per conto delle Ferrovie dello Stato s.p.a.

ORI G.G., (1993). *Continental depositional systems of the Quaternary of the Po plain (northern Italy)*. *Sediment. Geol.*, 83, 1-14.

REGIONE EMILIA-ROMAGNA & ENI-AGIP (1998). *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*. A cura di G. Di Dio, S.El. CA., Firenze, pp. 120.

RICCI LUCCHI F., (1986). *The Oligocene to Recent foreland basins of the Northern Apennines*. In P. A. Allen, P. Homewood (Ed.), *Foreland Basins*. I.A.S. Spec. Publ. 8, 105-139.

SCARPONI F., VICARI L., ARPA. (1997). *La qualità delle acque sotterranee a Bologna*. In: PAE 2001 Comune di Bologna - Relazione geologica e idrogeologica.

TRESCOTT P.C., PETER C., (1975). *Documentation of finite difference model of three dimensional ground-water flow*. U.S. Geological Survey Open-File Report 75-438.

10. RINGRAZIAMENTI

Sono state diverse le persone che mi hanno aiutato a portare a termine questo lavoro e che desidero ringraziare: il mio relatore, il Prof. Alessandro Gargini, per la totale disponibilità dimostrata nei miei confronti e per le numerose ore dedicate alla mia tesi, l'ingegner Giuseppe Traini per i preziosi consigli e il continuo supporto, il Dott. Stefano Cufegni, per le tantissime giornate vissute assieme in cantiere, per la sua disponibilità a dimmerare i miei dubbi durante la stesura di questo lavoro e per l'enorme quantità di materiali forniti, l'ing. Santo Polimeni, per le ore trascorse assieme ad implementare il modello di flusso e per l'infinita pazienza e disponibilità mostratami e il Dott. Pierluigi Montecassa, che mi ha aiutato, in qualsiasi momento avessi bisogno, a costruire i modelli tridimensionali. Tutte le persone sopracitate mi hanno messo a completa disposizione le loro capacità professionali e umane, rendendomi questo lavoro più facile e divertente; per questo gliere sarò sempre grato.

11. DEDICA

Da qualche mese l'ing. Giuseppe Traini, direttore scientifico della società Italler del gruppo Ferrovie dello Stato, ci ha lasciato. Si è spento dopo una breve malattia lasciando un vuoto incalcolabile a chi - come me - aveva avuto l'opportunità di conoscerlo sia professionalmente sia, soprattutto, umanamente. La grande passione che aveva per il lavoro e la sua professionalità sono state per me un esempio unico da seguire; se oggi ho la possibilità di presentare ma mia tesi su questa prestigiosa rivista gran parte del merito va a lui. Questo articolo è anche un piccolo modo per ricordarlo, sia per il continuo sostegno dimostratomi che per la sua disponibilità e umanità. Ciao Giuseppe!