POLITECNICO DI TORINO



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'AMBIENTE, DEL TERRITORIO E DELLE INFRASTRUTTURE - DIATI

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Effetto di eventi di piena sull'interazione tra acquifero e corso d'acqua: simulazione della falda superficiale nell'area metropolitana di Torino

Presentata da: Relatore:

Anna Rosa Sannino Prof. Tiziana Tosco

MATRICOLA: CORRELATORI:

S262603 Prof. Rajandrea Sethi

ING. FEDERICO ACCORSI

Indice

Pı	remessa	3
1.	Introduzione	4
2.	Inquadramento del sito	8
	2.1 Inquadramento geografico	8
	2.2 Inquadramento geologico	9
	2.3 Inquadramento idrogeologico	11
	2.4 Indagini svolte sul sito	12
	2.5 Assetto idrografico	13
	2.6 Monitoraggio del livello di falda	14
3.	Caratterizzazione dell'acquifero superficiale	20
	3.1 Prove idrodinamiche	20
	3.2 Modelli di interpretazione degli slug test	21
	3.3 Realizzazione degli slug test	23
4.	Descrizione dell'approccio modellistico	27
	4.1 Modellazione dei fenomeni di flusso in acquifero	27
	4.2 Simulazioni implementate	31
	4.3 Modello Concettuale	32
	4.3.1 Definizione del modello tridimensionale	32
	4.3.2 Proprietà idrauliche dell'acquifero	34
	4.3.3 Condizioni al contorno	35
	4.4 Calibrazione del modello di flusso	37
5.	Risultati	40
	5.1 Ricostruzione della superficie piezometrica	40
	5.2 Simulazione in regime stazionario	41
	5.3 Simulazione in regime transitorio	46
	5.3.1 Simulazione in regime transitorio con calibrazione delle proprietà di immagazzinamento dell'acquifero	49
	5.3.2 Simulazione in regime transitorio con calibrazione della conducibilità idraulica	51
C	onclusioni	56
В	ibliografia	57
Αl	legato I	60
	Stratigrafie	60
Αl	legato II	75
	Interpretazione degli slug test	75

Premessa

Il presente lavoro, condotto in collaborazione con il gruppo di ricerca di Ingegneria degli Acquiferi del DIATI, si inserisce in un'attività di valutazione relativa al possibile recupero e rifunzionalizzazione del Padiglione V di Torino Esposizioni. L'obiettivo del progetto consiste nello studio dell'interazione tra l'acquifero superficiale ed il fiume Po attraverso l'implementazione di un modello numerico di flusso che simula la variazione del livello di falda in concomitanza degli eventi di piena.

Il modello è stato sviluppato tramite software VisualModflow e, grazie ai dati raccolti dalla rete di monitoraggio installata ad hoc dal gruppo di ricerca nei pressi del Padiglione V, si è proceduto alla calibrazione e alla determinazione dei parametri idraulici dell'acquifero freatico.

1. Introduzione

Lo studio delle interazioni tra l'acquifero e i corpi idrici superficiali nei contesti urbani è di particolare rilevanza in quanto le variazioni del livello di falda, in concomitanza agli eventi di piena, possono influenzare la stabilità delle fondazioni di edifici, tramite l'incremento delle pressioni interstiziali (Huber et al., 2003; Morrison and Taylor, 1994), essere causa di infiltrazioni nelle strutture sotterranee, inclusi seminterrati, metropolitane e sistemi fognari, favorendo la risalita delle acque reflue (Karpf and Krebs, 2004; Wittenberg and Brombach, 2002). Inoltre, possono verificarsi fenomeni di rimobilitazione degli inquinanti all'interno dell'acquifero che compromettono l'utilizzo e l'approvvigionamento di acque potabili (Engeler et al., 2011; Kelman and Spence, 2004; Osenbrück et al., 2007; Reinstorf et al., 2009).

Episodi di inondazioni dovute all'innalzamento del livello della falda, risalenti agli ultimi decenni, possono essere ritrovati facilmente in letteratura: in Germania nell' agosto del 2002, si verificò un evento di piena del fiume Elbe che causò la risalita del livello idrico dell'acquifero superficiale. I danni causati dall'alluvione furono stimati a 6.2 miliardi di euro, di cui il 16 % furono attribuiti all'inondazioni delle acque sotterranee (Huber et al., 2003). Un altro esempio in area urbana si verificò a maggio del 1999 nel distretto di Bern (Svizzera), a seguito di un evento di piena del fiume Aare che causò 481 milioni di euro di danni di cui il 23 % dovuto ad inondazioni delle acque sotterranee (FOWG, 2004). In Europa, questo aspetto ha ricevuto maggiore attenzione da quando il rischio di inondazione delle acque sotterranee è stato incluso all'interno della direttiva 2007/60/CE ("Direttiva alluvioni"). La direttiva fornisce indicazioni comunitarie per la valutazione e la gestione del rischio di alluvione, producendo delle mappe di pericolo e introducendo adeguate misure di prevenzione e protezione dalle inondazioni. La valutazione quantitativa del rischio dovrebbe includere modelli numerici per riprodurre i processi di innalzamento della falda e fornire informazioni fondamentali alla valutazione del danno (Kreibich and Thieken, 2008; Schinke et al., 2012).

In generale, per capire ed analizzare le interazioni tra acque sotterranee e acque superficiali bisogna considerarle come componenti interconnesse del ciclo

idrologico, in cui l'acqua può muoversi in continuo tra i due elementi (Winter et al.1999).

Il ciclo idrologico consiste nell'alternarsi dei processi di trasformazione, indefiniti nel tempo, che trasferiscono l'acqua dalla superficie della Terra all'atmosfera e, seguendo il percorso inverso, dall'atmosfera alla superficie. Durante questi spostamenti l'acqua cambia stato, trasformandosi da solido a liquido, da liquido ad aeriforme o viceversa (Figura 1). Il sole attiva il ciclo riscaldando i mari e gli oceani, l'acqua evapora e si condensa in atmosfera sotto forma di vapore formando nubi. Successivamente precipita sulla superficie sotto forma liquida (pioggia) o solida (neve/ghiaccio); mentre una gran parte delle precipitazioni cade nei mari, una parte cade sulle terre emerse dove, a causa della gravità, fluisce come ruscellamento superficiale. Parte del ruscellamento superficiale raggiunge i fiumi e si muove come flusso incanalato verso il mare, mentre parte di esso si accumula come acqua dolce nei laghi e nei fiumi. Non tutto il ruscellamento score in corpi idrici superficiali, molto se ne infiltra nel (infiltrazione). Le infiltrazioni alimentano gli acquiferi immagazzinano enormi quantità di acqua dolce sotterranea per lunghi periodi di tempo. Parte dell'acqua sotterranea può filtrare di nuovo entro corpi idrici superficiali (e nel mare), mentre parte trova vie d'uscita nella superficie della terra ed emerge come sorgenti d'acqua dolce. Nel tempo, tuttavia, quest'acqua continua a muoversi, e parte rientra nel mare dove il ciclo termina...e ricomincia. (USGS, Water Science School).



Figura 1. Ciclo idrologico.

Si intuisce che la caratteristica essenziale di un sistema acquifero è il bilancio tra flussi in entrata, flussi in uscita e acqua immagazzinata (*Rushton & Kruseman*, 2004) ma è importante osservare che i diversi flussi sono caratterizzati da scale temporali molto differenti tra loro, in rapporto allo stato fisico in cui si trova l'acqua. Osservando i flussi in maniera quantitativa, è possibile inoltre sottolineare come questi siano molto diversi fra loro e molto variabili nello spazio e nel tempo (*Winter, et al., 1998*), le precipitazioni sono fortemente mutevoli e ovviamente dipendenti dalle condizioni climatiche, così come l'evapotraspirazione e l'evaporazione diretta dal suolo e dai corpi idrici superficiali.

Risulta evidente che l'interazione tra acque sotterranee e superficiali è molto complessa e il concetto delle diverse scale, che spesso riguarda molti fenomeni naturali, rappresenta un aspetto fondamentale.

A scala locale o di tratto fluviale (lunghezza 5-10 km) l'interazione fiume-falda può avvenire, prevalentemente, attraverso due modalità (Figura 2): nella prima si instaura un flusso d'acqua di falda attraverso il letto del fiume, mentre nella seconda le acque superficiali filtrano verso la falda. La direzione del flusso è legata essenzialmente al gradiente idraulico che si instaura tra il livello idrico nel fiume e l'altezza piezometrica dell'acquifero. In caso di fiume drenante, si ha un carico idraulico della falda maggiore rispetto a quello del fiume, il flusso è quindi orientato verso il corso d'acqua; in caso di fiume alimentante, invece, si verifica la situazione opposta ed il flusso è entrante nell'acquifero. Lungo lo sviluppo dell'asta fluviale, in generale, è possibile incontrare un'alternanza di queste due situazioni che sono caratterizzate da variabilità legate al ciclo idrologico ed allo sfruttamento della risorsa idrica. In particolari condizioni idrologiche, quale ad esempio un evento di piena, si può avere un'inversione del comportamento della falda: se in condizioni di magra il fiume è di tipo drenante, l'innalzamento del livello idrico del fiume in piena può determinare un'inversione del gradiente idraulico, portando il corso d'acqua ad un comportamento di tipo alimentante (Kalbus E. et al, 2006).





Figura 2. Relazione di drenaggio o alimentazione tra fiume e acque sotterranee (fonte: Lasagna M, De Luca D.A / Giornale di Geologia Applicata 2008,8 (1) 75-87).

In questa trattazione si esamina un caso studio per il quale vanno indagate le variazioni del livello della falda in risposta agli eventi di piena del fiume Po, nei pressi di alcuni edifici della città di Torino. Lo studio ha lo scopo di valutare la possibile realizzazione di un piano interrato all'interno del Padiglione V di Torino Esposizioni, situato su depositi alluvionali, caratterizzanti l'acquifero superficiale, che hanno un buon contatto idraulico con il fiume.

La valutazione quantitativa delle interazioni tra la falda e il fiume avviene, su scala locale, attraverso la realizzazione di un modello numerico del flusso sotterraneo dell'acquifero superficiale.

Per la caratterizzazione dell'acquifero sono stati utilizzati i dati geologici e idrogeologici dell'area, disponibili in letteratura, integrati con indagini dirette del sottosuolo. La costruzione del modello numerico è stata realizzata tramite interfaccia VisualModflow del software MODFLOW-2005, che implementa codici di calcolo modulari alle differenze finite per la risoluzione dell'equazione di flusso in acquifero. Infine, il modello è stato calibrato, al fine di individuare il valore di conducibilità idraulica maggiormente rappresentativo dell'acquifero oggetto di studio, confrontando in maniera automatica i valori del livello di falda simulati con i livelli misurati in campo all'interno dei piezometri di osservazione appositamente inseriti nei pressi del Padiglione.

Il modello è stato implementato per due tipi di simulazioni:

- 1. simulazioni in regime stazionario del flusso col fine di analizzare la risposta del modello ed effettuarne la taratura;
- 2. simulazioni in regime transitorio per interpretare e riprodurre le dinamiche idrogeologiche in atto nell'area studiata.

2. Inquadramento del sito

2.1 Inquadramento geografico

Il Padiglione V di Torino Esposizioni, noto anche come Padiglione Morandi dall'omonimo progettista Riccardo Morandi, è stato realizzato tra il 1936 ed il 1940 e successivamente modificato ed ampliato nel decennio a cavallo tra '50 e '60. La struttura è situata all'interno del Parco del Valentino, circa 300 m a Sud-Ovest rispetto al Castello del Valentino, sede della facoltà di Architettura del Politecnico di Torino e circa 200 m ad Ovest rispetto la sponda occidentale del fiume Po (*Figura 3*).

L'accesso al padiglione avviene attraverso una rampa discendente che raccorda il piano stradale di via Carlo Ceppi ad una quota di circa +231,0 m s.l.m. al piano di calpestio della struttura che risulta completamente interrata.

Il padiglione è costituito da un unico ambiente voltato a tre navate, con piano di calpestio alla quota di +223,80 m s.l.m., -9,35 m dalla quota più alta del terreno circostante (area SO verso il monumento ad Amedeo di Savoia).

L'area, vista la sua vicinanza con la sede di architettura del campus del Valentino, nello "Studio di fattibilità per insediamenti della città e del Politecnico di Torino" redatto nel 2018, è stata individuata come potenziale volume supplementare di grande valore per il Politecnico da sfruttare per le attività di accoglienza, distribuzione, incontro, studio, didattica informale, come spazio espositivo, nonché tutte quelle funzioni, oggi non prevedibili, che potranno emergere in futuro.



Figura 3. Vista aerea Padiglione Morandi (poligono rosso) immagine di Google Satellite.

Pertanto, le variazioni del livello di falda nei pressi del Padiglione Morandi andranno confrontate con quanto previsto dal progetto di riqualificazione, ed in particolare con l'ipotesi di realizzazione di un ulteriore piano interrato. Le quote di riferimento di specifico interesse, deducibili dallo Studio di Fattibilità sono le seguenti:

- La quota del piano di calpestio attuale, pari a 223.8 m s.l.m.
- La quota del piano di calpestio prevista dal progetto, pari a 218.8 m.
- La quota inferiore delle fondazioni di progetto, pari a 217.3 m.

2.2 Inquadramento geologico

L'area della città di Torino posta ad Ovest del fiume Po risulta costituita a livello geologico dagli apporti successivi delle conoidi alluvionali di età Quaternaria poste allo sbocco delle valli alpine della Dora Riparia e della Stura di Lanzo (Figura 4). Le conoidi alluvionali sono costituite da depositi a prevalente granulometria ciottoloso-ghiaiosa con matrice sabbioso-limosa di origine fluvioglaciale, successivamente rimodellati, almeno nei livelli più superficiali (4-5 m), dai corsi d'acqua che attraversano il territorio e dall'opera dell'uomo (riporti antropici). Subordinati ai depositi a granulometria più grossolana ed intercalati a questi ultimi si ritrovano lenti e livelli di limi e limi sabbiosi-argillosi

per spessori massimi pari a 2 m. I depositi quaternari coprono in successione formazioni marine e formazioni di transizione, dell'era terziaria, che affiorarono estensivamente nell'area collinare del territorio della città posto ad E-SE rispetto al corso del Fiume Po. Tali depositi sono costituiti principalmente da rocce detritiche a granulometria fine, rocce evaporitiche e organogene. Il contatto con i soprastanti terreni quaternari è erosivo e comporta quindi una variabilità spaziale sia lateralmente che verticalmente abbastanza marcata della sequenza litologica nel sottosuolo urbano.

L'assetto geologico generale, ricostruito dalle numerose indagini geognostiche svolte nel sottosuolo torinese, è quindi suddivisibile, per i primi 150 metri circa, in quattro complessi litostratigrafici principali:

- 1. Depositi di origine antropica (riporti) costituiti da ciottoli, ghiaie e sabbie da poco a nulla coesivi con abbondanti frammenti di laterizi e depositi fluviali attuali, recenti ed antichi (Olocene-recente) costituiti da ghiaie, sabbie e limi da poco a debolmente alterate;
- 2. Depositi fluvioglaciali e fluviali Rissiani (Quaternario), principalmente composti da ghiaie e ciottoli in matrice sabbioso-limosa con presenza discontinua di lenti e livelli caratterizzati da cementazione (conglomerato);
- 3. Depositi lacustri e fluviolacustri attribuiti genericamente al Villafranchiano (Auct.) (Pleistocene Inferiore-Pliocene Superiore), composti da limi argillosi alternati a livelli sabbioso-ghiaiosi;
- 4. Depositi d'ambiente marino neritico del Pliocene (Zancleano), composti da limi argillosi, limi sabbiosi-argillosi e sabbie limoso-argillose grigio-azzurre fossilifere (Argille di Lugagnano o Argille Azzurre).

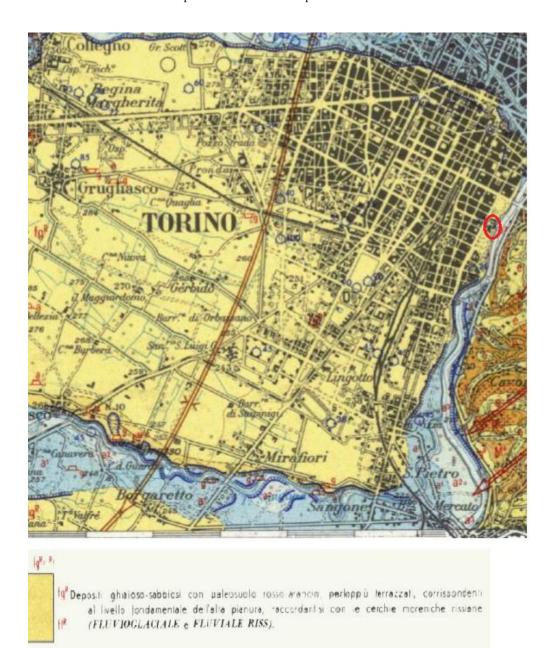


Figura 4. Stralcio Carta Geologica di Italia scala 1:100.000 (cerchiato in rosso il sito in esame).

2.3 Inquadramento idrogeologico

Nei complessi litostratigrafici sopra descritti si riscontra la presenza di due differenti acquiferi:

1. un primo acquifero, libero, ospitato nei depositi fluvioglaciali ghiaiosi - sabbiosi, con una zona di transizione al Villafranchiano, costituita da livelli intercomunicanti di ghiaie e sabbie sature separate da lenti discontinue di limi e argille;

2. un secondo sistema multi-acquifero artesiano (in pressione) ospitato negli orizzonti più permeabili (lenti sabbioso-ghiaiose) dei depositi lacustri e fluviolacustri del complesso Villafranchiano;

Sulla base delle indagini condotte in un precedente studio idrogeologico dell'area, in prossimità dell'area di studio sono presenti depositi fluviali e fluvioglaciali (limoso-sabbioso-ghiaiosi), potenti circa 25-30 m, che costituiscono l'acquifero della falda superficiale e poggianti direttamente sui depositi impermeabili, o scarsamente permeabili per fessurazione, della Collina di Torino (*Bortolami, Di Molfetta, 2015*).

2.4 Indagini svolte sul sito

Per ricostruire l'assetto litostratigrafico locale e la geometria dell'acquifero superficiale sono state eseguite una serie di indagini, comprensiva di sondaggi geognostici, sondaggi ambientali e prove idrodinamiche (descritte nel capitolo 3). Il piano di indagine ha previsto la realizzazione di 8 piezometri di diametro di 3" (P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8), i quali sono stati successivamente utilizzati per l'installazione della strumentazione di monitoraggio della falda.

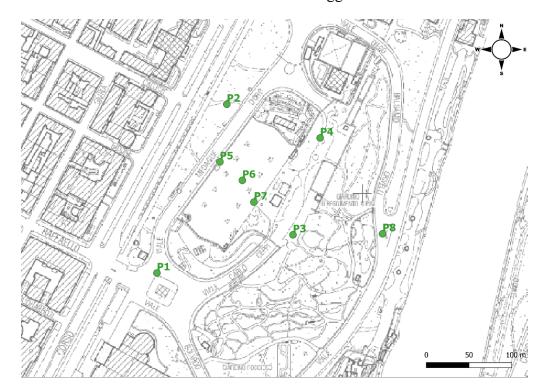


Figura 5. Ubicazione dei piezometri per i sondaggi geognostici

I risultati dei sondaggi hanno restituito una stratigrafia più dettagliata del sito, utilizzata come elemento di definizione del modello concettuale (*Allegato I*). La

profondità dei sondaggi è di circa 30 m dal piano campagna per i piezometri esterni al padiglione (P1,P2,P3,P4) e di 18 m per il piezometro posto vicino al fiume (P8); i sondaggi interni al padiglione hanno una profondità di 15 m (P5,P7) e 20 m (P6) dal piano di calpestio.

Le quote plano-altimetriche dei piezometri (*Tabella 1*) sono state rilevate dal gruppo di ricerca del DIATI del prof. Cina.

Dianamatus	iezometro Est (m)	Nord (m)	Quota (m)	
Plezometro			Gancino sondino	Boccapozzo
P1	396233.748	4989387.554	231.715	231.604
P2	396315.642	4989585.246	231.9012	231.8992
Р3	396393.138	4989432.234	230.008	229.7973
P4	396425.006	4989545.759	230.4501	230.4131
P5	396307.564	4989517.747	223.581	223.615
P6	396333.806	4989496.084	223.5699	223.524
P7	396347.394	4989470.542	223.5683	223.489
P8	396498.128	4989433.474	218.2724	218.2414

Tabella 1. Coordinate plano-altimetriche (UTM ETRF2000 32N) dei piezometri P1-P8 (fonte: relazione del prof. Cina del 6 maggio 2019)

2.5 Assetto idrografico

L'area di indagine si colloca in destra orografica del fiume Po, che scorre in direzione nordest a circa 200 m dall'edificio in oggetto. Le oscillazioni del livello idrometrico sono controllate attraverso stazioni idrometriche ufficiali della Regione Piemonte. In particolare, i dati ad oggi disponibili, ed utilizzabili con modalità diverse, comprendono (*Figura 6*):

Misure di livello del fiume Po in corrispondenza del Ponte Vittorio
Emanuele I, del Ponte Balbis e della Passerella Maratona, forniti dal
Comune di Torino. Le misure sono disponibili con diversa frequenza e su
diversi periodi a seconda del punto di misura: ogni 4 ore per il Ponte Vittorio
Emanuele I, ogni 6 ore per il ponte Balbis.

È importante notare la mancanza di un punto di acquisizione del dato idrometrico del fiume Po in prossimità del Padiglione Morandi.

Per la valutazione qualitativa delle interazioni fiume-falda sono stati presi in considerazione i dati registrati dalla stazione idrometrica del ponte Vittorio Emanuele I, mentre per la calibrazione del modello numerico è stato necessario misurare il livello del fiume Po sulla sponda occidentale in corrispondenza del Padiglione durante la campagna di monitoraggio del 16 ottobre 2020.

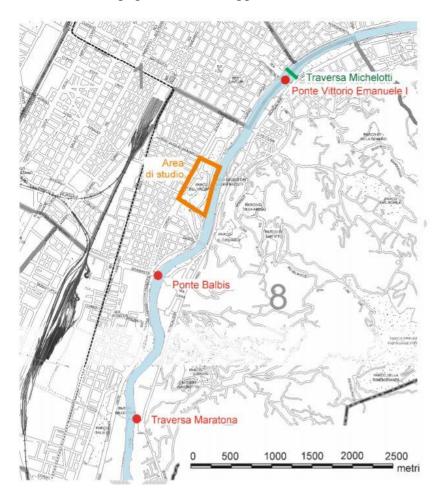


Figura 6. Ubicazione dei punti di monitoraggio del livello del fiume Po, della traversa Michelotti e dell'area di studio (fonte: Report dei monitoraggi del gruppo di ricerca di Ingegneria degli Acquiferi DIATI).

2.6 Monitoraggio del livello di falda

La valutazione quantitativa della relazione fiume-falda basata sullo sviluppo di un modello numerico di flusso necessita di misure di livello piezometrico della falda superficiale. In mancanza di dati locali (*Figura 7*), il 18 marzo 2019 il gruppo di ricerca di Ingegneria degli Acquiferi del DIATI ha installato la strumentazione per il monitoraggio del livello di falda dell'acquifero superficiale in corrispondenza dei tre piezometri, (P5, P6 e P7) collocati rispettivamente nel corridoio ovest, nella navata centrale e nel corridoio est del padiglione e il 2

maggio 2019 sono stati attrezzati anche i 5 piezometri esterni (P1, P2, P3, P4, P8).

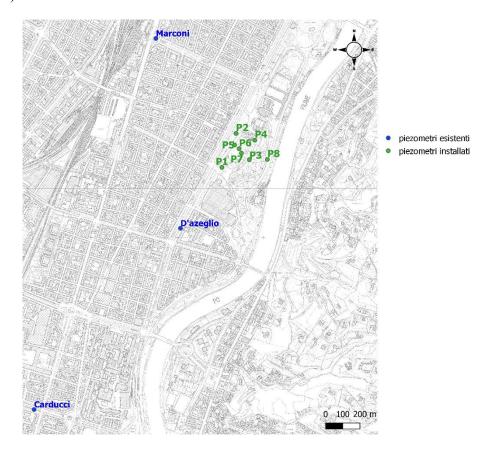


Figura 7. Piezometri presenti nell'area oggetto di studio

Al fine di ottenere un monitoraggio continuo del carico idraulico sono stati installati otto trasduttori di pressione, all'interno di ciascun piezometro; periodicamente si è proceduto alla raccolta dei dati registrati e ad una verifica della loro attendibilità tramite misurazione manuale del carico idraulico attraverso l'utilizzo di un freatimetro.

Il carico idraulico rappresenta l'energia totale per unità di peso di una particella d'acqua:

$$h = \frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{gp} \quad (1)$$

in cui $\frac{v^2}{2g}$ rappresenta la componente cinetica, z la componente gravitazionale e $\frac{p}{gp}$ la componente di pressione; poiché la velocità dell'acqua nel sottosuolo è molto bassa, il termine cinetico è del tutto trascurabile e l'espressione del carico idraulico si riduce a:

$$h = z + \frac{p}{gp} = z + h_p \quad (2)$$

nella quale z rappresenta l'altezza geodetica del punto in cui viene misurato il carico idraulico e h_p l'altezza idrostatica (Di Molfetta, Sethi, 2012).

Per la misurazione manuale del carico idraulico è stato utilizzato un freatimetro. Il freatimetro o sonda piezometrica (*Figura 8*) è composto da un nastro graduato al cui capo è presente un sensore ("puntale") che emette un segnale nel momento in cui tocca la superficie dell'acqua.

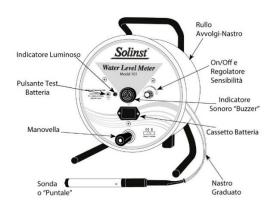


Figura 8. Sonda piezometrica o freatimetro (water level meter).

Attraverso l'utilizzo del freatimetro è stata misurata la soggiacenza, h_w , profondità dell'acqua all'interno del piezometro; dalla quale, nota la quota geodetica del piano campagna z_t è stato calcolato il livello piezometrico h, quota della falda sul livello del mare, che coincide con il carico idraulico in un punto dell'acquifero (Figura 9):

$$h = z_t - h_w = h = z + h_p$$
 (3)

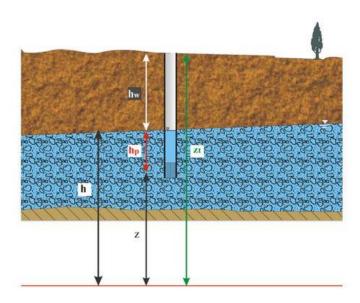


Figura 9. Misura del carico idraulico

Per la misura in continuo del livello della falda in ciascun piezometro è stato installato un trasduttore di pressione (*Solinst LT Levelogger Edge M20*) con frequenza acquisizione del dato ogni 30 minuti.



Figura 10. Trasduttore di pressione Solinst LT Levelogger Edge M20

Il misuratore deve essere posizionato al di sotto del livello piezometrico; esso registra la pressione assoluta agente sulla faccia inferiore, data dalla somma della pressione esercitata dalla quota parte della colonna d'acqua sovrastante il sensore e dalla pressione barometrica, esercitata dalla colonna d'aria sovrastante. La pressione assoluta viene poi convertita nel corrispettivo livello di falda tramite l'utilizzo del *Levelogger PC Software*, che correla la variazione di pressione registrata dal sensore alla variazione del livello di falda. Per ottenere una misura accurata del livello idrico della falda è necessario sottrarre alla pressione assoluta la pressione barometrico, essa varia in funzione dell'altitudine e del clima. Nel piezometro P5 è stato installato uno strumento per la misura della pressione atmosferica (*Barologger Solinst LT Barologger Edge M1.5*), per la

compensazione delle misure di livello, con frequenza di acquisizione del dato uguale a quella dei trasduttori.

L'attività di monitoraggio in continuo dei livelli idrometrici del fiume Po e dei livelli della falda superficiale nell'arco temporale di un anno ha permesso di identificare le interazioni tra la falda e il fiume.

In particolare si è registrato un evento di piena significativo del fiume il 25 novembre 2019, associato ad un forte fenomeno di precipitazione. Come mostrato in *Figura 11*, la risposta dell' acquifero superficiale è immediata e l'innalzamento dei livelli di falda coincidono con l'aumento del livello idrometrico del fiume.

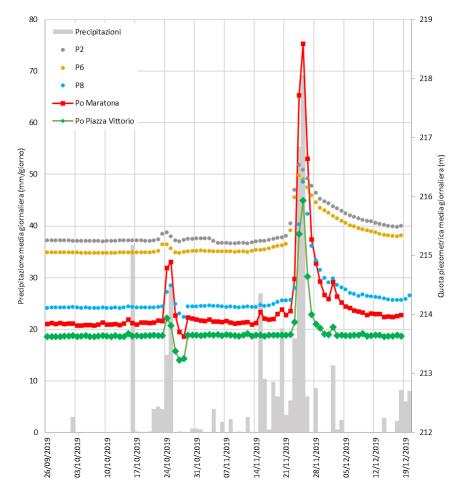


Figura 11. Misure compensate della quota piezometrica rilevata nei piezometri P2, P6 e P8 nel periodo 26 settembre-20 dicembre 2019, riportata come media giornaliera dei livelli; precipitazioni giornaliere rilevate alla stazione di monitoraggio Vallere e livelli del fiume Po misurati alle stazioni della Passerella Maratona e del Ponte Vittorio Emanuele I. (Fonti: Report dei monitoraggi del gruppo di ricerca di Ingegneria degli Acquiferi DIATI).

Il confronto dei livelli di falda e del fiume Po, registrati alla stazione idrometrica di Ponte Vittorio Emanuele, durante l'evento di piena ed il successivo

esaurimento (*Figura 12*) indica un buon contatto idraulico tra falda e fiume. I livelli di falda si mantengono sempre al di sotto (di circa 1 m) della quota delle fondazioni di progetto (217.30 m s.l.m.) e circa 2.5 m al di sotto del nuovo piano di calpestio (218.8 m s.l.m.). È importante sottolineare però, che la portata di piena stimata da ARPA per l'evento di novembre 2019 è significativamente inferiore rispetto alle portate di progetto (piena con tempo di ritorno di 200 anni).

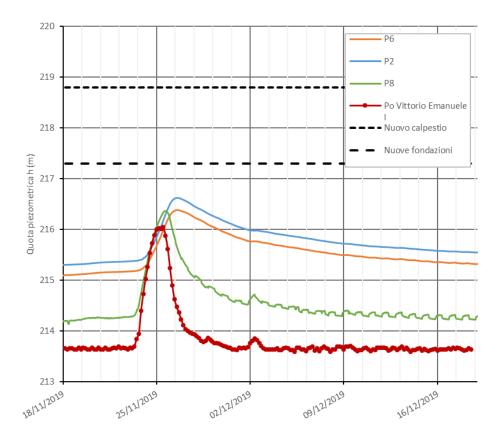


Figura 12.Livelli idrometrici del fiume Po alla stazione Ponte Vittorio Emanuele I e livelli piezometrici in P2,P6,P8 nel periodo 18 novembre- 20 dicembre 2019. Sul grafico sono riportati anche il livello di base delle fondazioni e del piano di calpestio previsti dal progetto (fonte: Report dei monitoraggi del gruppo di ricerca di Ingegneria degli Acquiferi DIATI).

In questo studio si andrà a simulare il moto di filtrazione durante l'evento di piena registrato in modo da ricostruire la dinamica dell'acquifero superficiale e quantificare le connessioni tra i due corpi idrici.

3. Caratterizzazione dell'acquifero superficiale

Lo sviluppo di un modello numerico per la risoluzione dell'equazione di flusso dell'acquifero superficiale richiede la determinazione preliminare delle caratteristiche idrauliche dell'acquifero: conducibilità idraulica K (m/s) e coefficiente di immagazzinamento specifico Ss (1/m). A questo scopo sono state effettuate due campagne di caratterizzazione in sito attraverso l'esecuzione di slug test; la prima svolta dal gruppo di ricerca di Ingegneria degli Acquiferi in occasione dell'installazione del sistema di monitoraggio del livello della falda il 2 Maggio 2019, la seconda campagna, invece, effettuata il 16 ottobre 2020 durante le operazioni di raccolta dei dati, con esecuzione slug test all'interno dei soli piezometri P6,P7,P8; le prove sono state ripetute per tre volte in ciascun piezometro. I risultati delle due campagne sono state poi confrontate.

3.1 Prove idrodinamiche

Gli slug test sono prove a pozzo singolo, eseguite in regime transitorio, con variazione istantanea del livello piezometrico. La prova può essere eseguita aumentando bruscamente il livello statico misurato nel pozzo attivo e monitorando il conseguente declino di livello che si crea per il flusso dal pozzo verso l'acquifero (test in declino o con carico decrescente, Figura 13) o, viceversa, producendo una brusca diminuzione di livello e monitorando la conseguente risalita che si crea per il flusso dall'acquifero verso il pozzo (test in risalita o con carico crescente). La seconda modalità è la più utilizzata in relazione alla sua maggiore semplicità operativa ed è la modalità adottata per il presente studio. La variazione iniziale di livello H₀ viene realizzata per mezzo di un elemento cilindrico metallico di volume noto (detto "slug"), il quale viene calato all'interno del piezometro a circa 50 cm sotto il livello statico; dopo l'iniziale innalzamento del livello dell'acqua segue una fase di stabilizzazione o recupero del livello. Una volta raggiunte nuovamente le condizioni di equilibrio, lo slug viene rapidamente estratto, provocando l'istantaneo abbassamento del livello dell'acqua, cui segue il recupero del livello originario. Il recupero di livello viene monitorato da un trasduttore calato al di sotto del livello statico, con frequenza di acquisizione prestabilita.

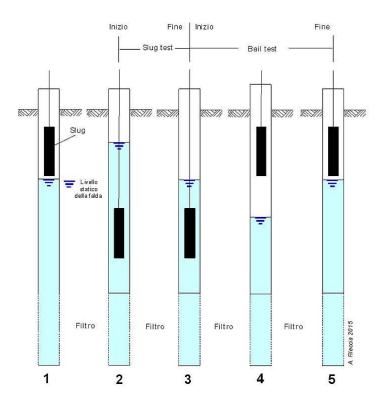


Figura 13. Descrizione Slug test (fonte: A.Fileccia- Geocorsi.it)

3.2 Modelli di interpretazione degli slug test

Per l'interpretazione degli *slug test*, a partire dagli anni '50 sono stati sviluppati alcuni modelli matematici bidimensionali di tipo analitico e semi-analitico: i più utilizzati sono quelli Hvorslev (1951), Cooper, Bredehoeft e Papadopulos (Cooper et al., 1967) e Bouwer e Rice (1976). La principale limitazione di questi metodi è quella di non poter tenere conto della parziale penetrazione o del parziale completamento di pozzi e di ipotizzare il flusso assolutamente orizzontale, compreso tra due limiti impermeabili costituiti dai piani virtuali passanti per gli estremi del tratto finestrato. Successivamente (Hyder et al., 1994) è stato sviluppato da un gruppo di ricercatori del Kansas Geological Survey (KGS) un modello semi-analitico tridimensionale per l'interpretazione dei test eseguiti su pozzi a parziale penetrazione e/o completamento in acquiferi non confinati. Tale modello, indicato sinteticamente come modello KGS, rappresenta ad oggi la metodologia d'interpretazione più avanzata e affidabile. Il modello tridimensionale utilizzato incorpora l'effetto dell'immagazzinamento della formazione acquifera e prende in esame due distinte condizioni al contorno per il top della formazione: flusso nullo e carico idraulico costante. Le loro

soluzioni possono pertanto essere applicate all'interpretazione di slug test eseguiti in acquiferi confinati e non confinati (*Di Molfetta e Sethi, 2012*).

Il modello KGS prende in esame:

- l'immagazzinamento della formazione;
- il bilancio di massa pozzo-acquifero;
- la parziale penetrazione del pozzo o piezometro;
- l'eventuale anisotropia della formazione;
- il danneggiamento di permeabilità nell'intorno del pozzo;
- le tipologie di acquifero confinato e non confinato.

La variazione di livello adimensionale s/so può essere espressa come:

$$\frac{s}{s_0} = f(K_r, K_z, S_s, K'_r, K'_z, S'_s, L, D, b)$$
(4)

nella quale i parametri K_r , K_z e S_s si riferiscono alla corona circolare nell'intorno del pozzo dove, per effetto dei fluidi di perforazione e di un non adeguato sviluppo, ci può essere un danneggiamento di permeabilità ("skin effect"). K_r è la conducibilità idraulica in direzione radiale, K_z è la conducibilità idraulica in direzione verticale, S_s è il coefficiente di immagazzinamento specifico, L è la lunghezza del tratto finestrato, D è la lunghezza del tratto di tubazione del piezometro al di sotto del livello statico, D è lo spessore saturo in condizioni statiche.

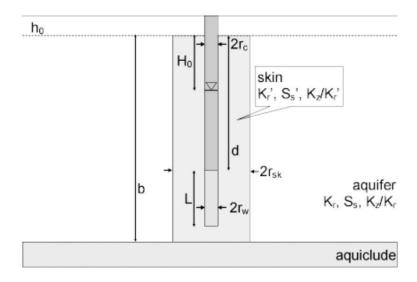


Figura 14.Parametri di un pozzo o piezometro nel metodo KGS per un acquifero non confinato (fonte: AQTESOLV).

L'interpretazione di uno slug test con il metodo KGS si effettua mediante la sovrapposizione della curva sperimentale con curve campione generate da specifici software.

La soluzione matematica di Springer and Gelhar (1991), invece, estende la soluzione di Bouwer-Rice (1976) per determinare la conducibilità idraulica degli acquiferi non confinati prendendo in considerazione gli effetti inerziali del pozzo e la risposta oscillatoria dello slug test in acquiferi con una conducibilità elevata. Le assunzioni per la soluzione di Springer and Gelhar (1991) sono:

- Acquifero infinito
- Acquifero omogeneo e di spessore uniforme
- Superficie piezometrica dell'acquifero inizialmente orizzontale
- Pozzo con penetrazione completa o parziale
- Acquifero non confinato
- Flusso stazionario

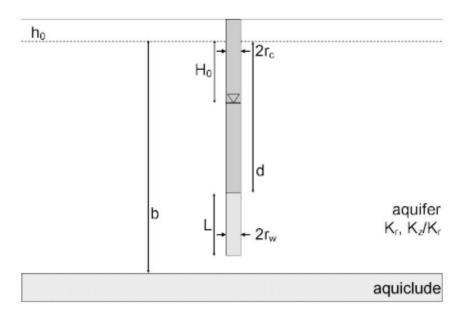


Figura 15. Parametri per l'interpretazione di uno slug test con il metodo Springer- Gelhar (1991) (fonte: AQTESOLV).

3.3 Realizzazione degli slug test

I parametri caratteristici delle prove idrodinamiche realizzate il 16 ottobre 2020 sono riassunti in *Tabella 2*.

	Parametro	P6	P7	P8
Pozzi	Diametro (pollici)	3		
	Fondo pozzo (*) (m)	18	15	18
	Profondità trasduttore (*) (m)	10.7	10.7	7.2
	Top tratto fenestrato (*)(m)	6	6	3
	Bottom tratto fenestrato (*) (m)		15	18
	Lunghezza tratto fenestrato saturo			
	L = D (m)	9.51 6.51 13.83		
Slug	Lunghezza	1		
	Diametro (pollici)	1		
Acquifero	Spessore saturo (m)	20		
	Anisotropia Kv/Kh	1		

(*) da piano campagna.

Tabella 2.Caratteristiche geometriche di slug e piezometri del 16 ottobre 2020, rilevanti ai fini dell'interpretazione degli slug test

La durata dei test è stata molto breve, con un recupero del livello indisturbato in circa 10-20 secondi, indice di una elevata conducibilità idraulica, coerentemente con quanto riportato da studi di letteratura per l'acquifero superficiale oggetto di studio. I test sono stati interpretati tramite il software AQTESOLV, che implementa modelli matematici di tipo analitico e semi-analitico per la determinazione dei parametri idraulici dell'acquifero, seguendo il principio di sovrapposizione della curva teorica con quella sperimentale (*Figura 16*).

I risultati delle interpretazioni sono riportate nell' Allegato II, di seguito un esempio delle prove eseguite nei piezometri P6 e P8 della campagna del 16 ottobre 2020, rispettivamente interpretati con il metodo KGS e Springer-Gelhar.

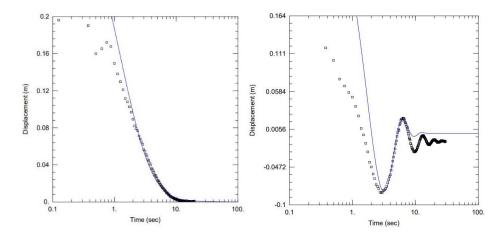


Figura 16. Interpretazione slug test con AQTESOLV, nell'immagine a sinistra una prova svolta nel piezometro P6 ed interpretata con il metodo KGS. A destra una prova effettuata nel piezometro P8 e interpretata con il metodo Springer e Gelhar (campagna del 16 ottobre 2020).

I valori di conducibilità idraulica e del coefficiente di immagazzinamento specifico delle due campagne hanno restituito risultati molto simili, come ci si aspettava.

	Coefficiente di immagazinamento specifico Ss (1/m)			
Piezometro	1	2	3	Media
P5	2.84E-04	7.82E-04	1.47E-04	4.04E-04
P6	3.70E-05	1.77E-04	1.73E-05	7.71E-05
P7	1.84E-04	7.06E-05	1.30E-04	1.28E-04

Tabella 3. Coefficiente di immagazzinamento specifico Ss ottenuti dall'interpretazione degli slug test mediante metodo KGS (campagna del 2 Maggio 2019).

	Conducibilità idraulica K (m/s)			
Piezometro	1	2	3	Media
P1	2.57E-04	2.80E-04	2.62E-04	2.66E-04
P2	2.04E-04	2.14E-04	2.10E-04	2.09E-04
Р3	1.67E-04	2.30E-04	2.01E-04	1.99E-04
P4	2.27E-04	2.30E-04	2.26E-04	2.28E-04
P5	1.03E-03	8.15E-04	5.94E-04	8.13E-04
P6	1.70E-04	2.29E-04	1.88E-04	1.96E-04
P7	2.68E-04	2.51E-04	2.70E-04	2.63E-04
P8	3.10E-04	3.30E-04	2.71E-04	3.04E-04

Tabella 4. Conducibilità idraulica K, valori ottenuti per le singole ripetizioni e valori medi (campagna del 2 Maggio 2019).

	Conducibilità idraulica K (m/s)			
Piezometro	Piezometro 1 2		3	Media
P6	1.76E-04	2.59E-04	1.87E-04	2.07E-04
P7	2.66E-04	4.75E-04	2.71E-04	3.38E-04
P8	3.11E-04	3.13E-04	3.29E-04	3.18E-04

Tabella 5. Conducibilità idraulica K, valori ottenuti per le singole ripetizioni e valori medi (campagna del 16 ottobre 2020)

Si è riscontrato, per tutti i piezometri, un valore medio di conducibilità idraulica prossimo a 2E-4 m/s, ma alla luce della relativa variabilità spaziale, illustrata in *Figura 17*, il valore di conducibilità idraulica è stato poi rideterminato mediante calibrazione dei dati osservati versus quelli simulati dal modello numerico.

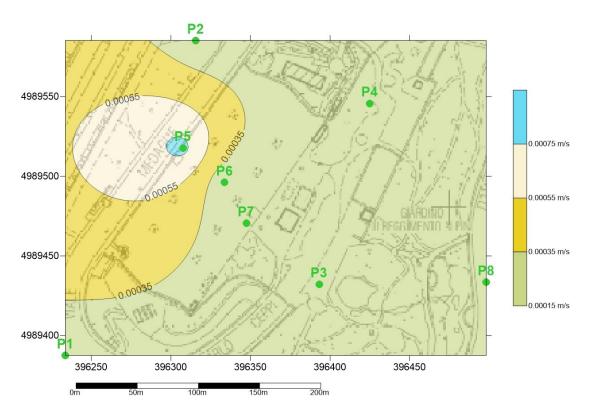


Figura 17. Variabilità spaziale della conducibilità idraulica ricostruita con il software Surfer 11, coordinate assi X- Est (m) Y- Nord (m) con sistema di riferimento UTM ETRF2000 32N.

4. Descrizione dell'approccio modellistico

4.1 Modellazione dei fenomeni di flusso in acquifero

La modellazione delle acque sotterranee rappresenta uno strumento per riprodurre i processi che si verificano nei sistemi idrogeologici naturali, sia nella fase di osservazione che in quella di previsione dell'effetto dell'interazione tra la falda e fattori esterni. Questo tipo di analisi presuppone la conoscenza delle caratteristiche geologiche e idrogeologiche dell'acquifero oggetto di studio, al fine di ricostruire il campo di moto dell'acqua sotterranea.

Per la modellazione numerica del flusso sotterraneo è stato utilizzato Visual MODFLOW Classic, interfaccia grafica del software MODFLOW, sviluppato dal United States Geological Survey nel 1983.

MODFLOW utilizza un modello di calcolo modulare (MODular) per la simulazione del flusso delle acque sotterranee (FLOW). Il modello, che opera con il metodo delle differenze finite riproducendo il flusso nelle tre dimensioni spaziali (x, y, z), offre la possibilità di simulare:

- Flussi associati ad agenti artificiali e naturali (es. pozzi, ricarica, drenaggi, ecc.);
- Differenti tipi di acquifero: libero, confinato, semi-confinato;
- Anisotropia nelle caratteristiche dell'acquifero.
- Flussi in condizioni stazionarie e transitorie.

L'equazione di flusso che governa il moto all'interno di un mezzo poroso viene generalmente derivata in riferimento ad un volume elementare rappresentativo (REV) del sistema, ossia un volume sufficientemente grande da non evidenziare le variazioni in scala microscopica ma abbastanza grande da rispecchiare la variabilità locale delle proprietà macroscopiche. L'equazione differenziale di flusso è la sintesi del principio di conservazione della massa, della legge di Darcy e dall'equazione di consolidazione del sistema acquifero (*Di Molfetta, Sethi, 2012*):

- Conservazione della massa:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho n) = -\nabla(\rho v) \quad (5)$$

Con ρ la densità di massa dell'acqua [M L⁻³], n la porosità [-], v le componenti della velocità di filtrazione lungo i tre assi di riferimento [L T⁻¹] e t il tempo [T]. L'equazione indica che la differenza tra la massa di acqua entrante ed uscente è pari alla differenza di massa d'acqua accumulata all'interno della matrice porosa del REV all'inizio ed alla fine dell'intervallo di tempo considerato.

Equazione di Darcy:

$$v = -\mathbf{K}\nabla h \tag{6}$$

Con K il tensore della conducibilità idraulica [L T⁻¹] ed h il carico idraulico [L]. Essa lega la velocità alle variazioni di carico idraulico.

- Equazione di consolidazione del sistema acquifero:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho n) = \rho S_S \frac{\partial h}{\partial t} \tag{7}$$

Con S_S coefficiente di immagazzinamento specifico [L-1]. Essa indica che a seguito di una variazione di carico idraulico il REV sarà soggetto ad una variazione dello stato tensionale. Nel caso di diminuzione del carico idraulico e quindi espulsione di un volume d'acqua, considerando il principio di Terzaghi delle tensioni efficaci, si avrà un aumento delle tensioni agenti sullo scheletro solido, cui consegue una sua contrazione che comporta la diminuzione della porosità, viceversa, un aumento del carico idraulico comporta un'espansione dello scheletro solido ed un aumento di porosità.

Il flusso tridimensionale in un acquifero omogeneo ed anisotropo, considerando un fluido a densità costante e un sistema di riferimento con direzioni uguali a quelli principali di anisotropia, può essere descritto dalla seguente equazione:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_S \frac{\partial h}{\partial t}$$
(8)

In cui:

- K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} rappresentano i valori della conducibilità idraulica lungo gli assi x,y e z [L T-1];
- h è il carico idraulico [L];

- W rappresenta il flusso volumetrico di ricarica o perdita per unità di volume, W > 0 indica la presenza di una zona di ricarica (flusso verso il sistema), W < 0 indica la presenza di una perdita (flusso verso l'esterno del sistema) [T⁻¹];
- *Ss* coefficiente di immagazzinamento specifico (definibile come " il volume di acqua liberato per unità di volume dell'acquifero per una diminuzione unitaria di carico idraulico" (*Di Molfetta, Sethi*)) [L-1].

Nel caso più generale (ovvero per un acquifero eterogeneo ed anisotropo), i parametri Ss, Kxx, Kyy, e Kzz sono funzioni dello spazio (Ss = Ss(x,y,z), Kxx = Kxx(x,y,z), Kyy=Kyy(x,y,z), Kzz=Kzz(x,y,z)) mentre il flusso volumetrico è funzione dello spazio e del tempo (W = W(x,y,z,t)). Note le condizioni al contorno, come ad esempio il carico idraulico, e le condizioni iniziali, la soluzione dell'eq. (8) rappresenta le dinamiche all'interno dell'acquifero. Nel caso stazionario, steady-state, il termine a destra dell'eq. (8) si annulla e la distribuzione dei carichi idraulici dipende esclusivamente dalla conducibilità idraulica e dal flusso volumetrico.

La risoluzione analitica dell'equazione (8) è possibile per sistemi acquiferi alquanto semplici, perciò al fine di ottenere una soluzione approssimata, si adottano diversi sistemi di risoluzione numerica.

Per la simulazione del flusso è stato utilizzato il codice tridimensionale MODFLOW-2005 (Harbaugh,2005), che utilizza un sistema di risoluzione alle differenze finite, in cui il sistema viene risolto in un numero determinato di punti nello spazio e nel tempo, denominati nodi, corrispondenti al punto centrale di ogni cella della griglia di calcolo (*Figura 18*)

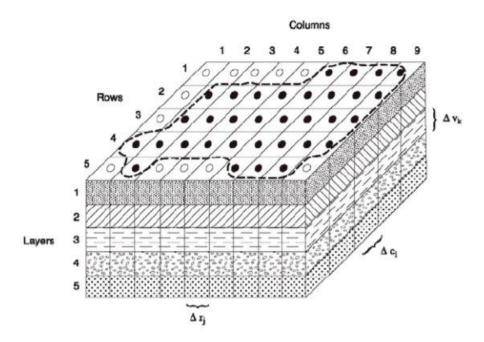


Figura 18. griglia di calcolo utilizzata dal software Modflow (Harbaugh, 2005)

Dove:

- la terna i,j,k definisce la posizione della cella rispettivamente per: righe, colonne e strati;
- la linea tratteggiata individua il contorno del sistema acquifero;
- i punti neri individuano le celle attive;
- i punti bianchi individuano le celle inattive;
- Δxi , Δcj , Δvk , indicano le dimensioni delle celle lungo l'asse x,y,z.

Le condizioni al contorno possono essere classificate in tre gruppi:

 I. condizione di pressione o carico assegnato (condizione di Dirichlet o del primo ordine), dove il carico relativo ad una cella o ad un gruppo di celle è impostato ad un valore fisso:

$$h(x, y, z, t) = c \qquad (9)$$

dove c è una costante.

II. condizione di flusso assegnato (condizione di Neumann o del secondo ordine), con la quale si assegna ad un valore specifico la derivata del carico in una determinata direzione. A questo gruppo appartengono le

celle con assenza di flusso, che sono un tipo particolare di condizione di flusso assegnato (es. limite impermeabile);

$$\frac{\partial h}{\partial y} = -\frac{q_y}{K_y} \tag{10}$$

In cui q_y rappresenta la portata specifica per unità di sezione [L T⁻¹] mentre K_y indica la conducibilità idraulica ortogonale alla sezione.

III. condizione di strato semipermeabile o di flusso dipendente dal carico (condizione di Cauchy o del terzo ordine), con il quale il flusso in entrata o in uscita dal sistema viene calcolato in funzione della differenza di carico a cui è associata questa condizione e una cella ad essa adiacente, mediante la seguente formulazione:

$$Q = CA(h_{bou} - h_{iik}) \qquad (11)$$

Dove: Q è il flusso per unità di superficie, h_{bou} è il carico idraulico associato alla boundary, h_{ijk} è il carico calcolato dal modello in una generica cella adiacente alla boundary, A è l'area della cella attraverso cui avviene la filtrazione, mentre C è la conduttanza tre due celle espressa da:

$$C = \frac{K_i}{h} \tag{12}$$

Dove K_i è la permeabilità in una direzione generica ortogonale all'interfaccia tra la *boundary* e la cella adiacente, mentre b è lo spessore dell'interfaccia.

4.2 Simulazioni implementate

Il presente studio si pone l'obiettivo di quantificare le interazioni tra il livello della falda e del fiume Po in concomitanza degli eventi di piena, per valutare la possibile realizzazione di un piano ipogeo nel Padiglione Morandi di Torino Esposizioni. Per il raggiungimento di tale obiettivo sono state implementate due tipi di simulazioni differenti: una in regime di flusso stazionario con lo scopo di effettuare la calibrazione della distribuzione di conducibilità idraulica ed una in regime di flusso transitorio al fine di simulare la variazione della falda durante l'evento di piena.

4.3 Modello Concettuale

In questa fase è necessario delineare il modello idrogeologico concettuale dell'acquifero esaminato; il modello concettuale insieme agli obbiettivi prefissati guideranno l'implementazione delle simulazioni numeriche. L'allestimento del modello è costituito da:

- 1. Definizione dei confini del modello e rappresentazione dell'ambiente fisico tridimensionale.
- 2. Definizione dei parametri fisici che costituiscono le variabili interne del sistema idrogeologico (proprietà idrauliche).
- 3. Definizione delle condizioni al contorno;

4.3.1 Definizione del modello tridimensionale

Sul piano orizzontale, per favorire la rappresentazione numerica, i confini dell'area da simulare sono stati scelti in modo da massimizzare l'impiego delle informazioni derivanti dalle stratigrafie disponibili e minimizzare gli effetti di bordo della simulazione rispetto alla posizione dell'area di interesse. L'area del modello ha un'estensione di 1050 x 1080 m².

Sul piano verticale, i risultati ottenuti dall'esecuzione dei sondaggi geognostici hanno permesso l'individuazione di un unico strato sabbioso-ghiaioso, nel quale risiede l'acquifero superficiale, con spessore saturo di 25-30 m, coerentemente con quanto riportato anche in altri studi dell'area.

Il passo della griglia di calcolo è stato fissato a 10 x 10 m nell'intero dominio e rifinito nella zona a monte del fiume Po da una maglia 5 x 10 m (*Figura 19*), con un totale di 12.450 celle. Le celle poste al di sotto o al di sopra delle condizioni al contorno sono state disattivate e non partecipano alla risoluzione dell'equazione di flusso.



Figura 19. Griglia di calcolo

La rappresentazione della superficie del terreno fa riferimento al modello digitale del terreno scaricato dal Geoportale Nazionale, il dato geo-riferito in coordinate WGS84 – UTM zone 32 N è restituito in formato raster (*Figura 20*).

L'elevazione dell'area varia dai 240 ai 216 m.s.l.m.



Figura 20. Elevazione del sito, modello digitale del terreno DTM

4.3.2 Proprietà idrauliche dell'acquifero

Il codice di calcolo prevede che ogni cella del modello, che non sia stata definita come cella inattiva (quindi esclusa dalla computazione) o a carico costante, venga caratterizzata da un set di proprietà idrauliche. Nelle simulazioni di flusso, i parametri di input da immettere nel modello sono le componenti principali del tensore della conducibilità idraulica (K_{xx} , K_{yy} , K_{zz}), il coefficiente di immagazzinamento specifico Ss e la porosità n.

In prima approssimazione, in accordo con quanto riscontrato negli slug test, si è assunto che la conducibilità idraulica sia isotropa in direzione verticale $(K_{xx}/K_{zz}=1)$ ed anisotropa sul piano orizzontale $(K_{xx}/K_{yy} \neq 1)$, data l'estensione del dominio di calcolo e al fine di ottimizzare la simulazione di flusso in acquifero. Le zone con diverse proprietà idrauliche sono raffigurate di seguito (*Figura 21*), divise in zona 1 (magenta) a monte del Padiglione e zona 2 (blu) a ridosso della sponda ovest del fiume Po comprendente il Padiglione Morandi.

I valori riportati in *Tabella 6* sono quelli immessi nel modello in via preliminare, essi sono stati ottimizzati a seguito del processo di calibrazione.



Figura 21. Distribuzione delle proprietà idrauliche: zona 1 magenta, zona 2 blu; le zone bianche rappresentano le celle inattive;

Parametri idraulici di input				
К1	1.00E-04	[m/s]		
К2	2.00E-04	[m/s]		
Ss 1	1.00E-05	[1/m]		
Ss 2	1.00E-06	[1/m]		
n1	2.00E-01	[-]		
n2	2.00E-01	[-]		

Tabella 6. Parametri idraulici iniziali del modello

4.3.3 Condizioni al contorno

La simulazione di flusso della falda freatica avviene computando la differenza di potenziale tra celle adiacenti a partire da condizioni iniziali note del carico idraulico (h).

I criteri decisionali per selezionare le condizioni al contorno si basano sulla topografia, sulla geologia e sull'idrogeologia.

Le condizioni al contorno, per il presente studio sono del primo tipo (carico assegnato) e del secondo tipo (carico non assegnato), fanno riferimento a due scenari:

- 1. comportamento della falda in condizioni ordinarie (modellazione in regime di flusso stazionario).
- comportamento della falda in condizioni di eventi di piena del Fiume Po (modellazione in regime transitorio).

Nel primo caso, le condizioni al contorno (Figura 22) per lo stato stazionario sono fissate sotto forma di celle a carico costante:

- Condizione di valle: livello idrometrico del Fiume Po.
- Condizione di monte: l'isopieza di 222 m s.l.m. ottenuta a partire dalle misure della campagna di monitoraggio del 16 ottobre 2020.
- Condizione ai lati e sul bottom del modello: non esplicitamente assegnate ma implementate automaticamente dal modello come condizione di Neumann.

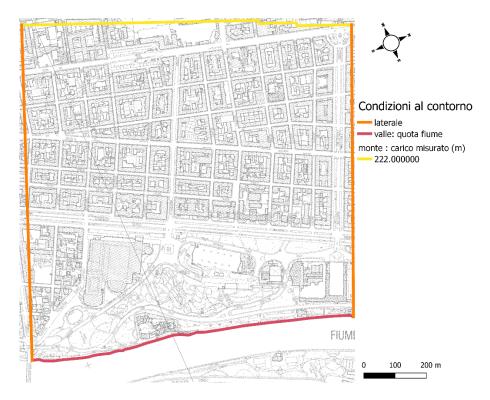


Figura 22. Condizioni al contorno

L'indagine del comportamento della falda in occasione dell'evento di piena, invece, richiede che le condizioni al contorno siano fissate sotto forma di celle a carico variabile. Questo tipo di modellazione tiene conto dei fattori esterni,

variabili nel tempo, che possono modificare la superficie dell'acquifero. Per cui le condizioni al contorno in regime transitorio sono:

- Condizione di monte: carico costante uguale all'isopieza di 221.797 m, assegnata ricostruendo la piezometria nei giorni antecedenti la piena (vedi paragrafo 5.3).
- Condizione di valle: carico variabile uguali ai livelli idrometrici registrati nella stazione di Ponte Vittorio Emanuele, durante l'evento di piena, con frequenza di acquisizione del dato ogni 4 ore in un periodo di riferimento di 31 giorni.

4.4 Calibrazione del modello di flusso

I valori iniziali di conducibilità idraulica sono stati soggetti ad un processo di calibrazione, attraverso il quale si pone il modello di flusso nei termini di un problema inverso e nel quale si usano le variabili dipendenti dell'equazione costitutiva per ricavarne i parametri (parametri di calibrazione). Obiettivo di questo processo è quindi di determinare il set di parametri e/o condizioni al contorno che possano minimizzare le differenze tra i valori acquisiti sperimentalmente in sito (punti di osservazione) con gli equivalenti valori calcolati nel modello numerico. In questo studio, i valori osservati sono rappresentati dalle misure del carico idraulico raccolte dalla rete di monitoraggio appositamente installata. Per quantificare il grado di approssimazione della calibrazione, i valori di carico idraulico misurati nei punti di osservazione e gli equivalenti valori di carico idraulico simulati vengono sottoposti ad elaborazione statistiche che si basano sul residuo (*R*) del i-esimo valore:

$$R_i = (h_m - h_s)_i \qquad (13)$$

Dove h_m e h_s sono rispettivamente il carico idraulico misurato e calcolato in un punto di osservazione. Il parametro statistico che generalmente viene usato per valutare il risultato del processo di calibrazione è lo scarto quadratico medio normalizzato (nRMS), espresso in percentuale e definito come lo scarto quadratico medio (RMS) rapportato al range di valori misurati:

$$RMS = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} R_i^2\right]^{0.5} \tag{14}$$

$$nRMS = \frac{RMS}{h_{m \, max} - h_{m \, min}} \tag{15}$$

Un primo approccio tradizionalmente adottato per eseguire la calibrazione viene definito *trial-and-error* e la sua esecuzione, finalizzata a fornite una soluzione indiretta al modello inverso, prevede di modificare i parametri di input e di rifare il *run* del modello, tante volte fin quando non si raggiunge il grado di approssimazione desiderato.

Nell'ambito di questo lavoro,si è deciso di adottare il metodo della calibrazione automatica attraverso l'uso di PEST (Parameter ESTimation; Doherty, 2015). PEST è un software di ottimizzazione dei parametri, model-indipendent, che incorpora un algoritmo *Gauss-Marquardt-Levemberg* (GML) di regressione non lineare ai minimi quadrati. PEST, così come altri pacchetti di calibrazione, è finalizzato alla minimizzazione della funzione obiettivo (\$\phi\$; intesa come ricerca del punto di minimo della sua superficie multidimensionale), calcolata come la somma del quadrato dei residui pesati. Nel caso di un'unica tipologia di target di calibrazione (come nel caso in oggetto) la funzione obiettivo è espressa con la seguente formulazione:

$$\phi = \sum_{i=1}^{n} [w_{hi}((h_m - h_s)_i)]^2 \quad (16)$$

dove w_{hi} è il peso della i-esima misura (*osservazione*) di carico idraulico mentre h_m e h_s sono rispettivamente il carico idraulico misurato e il carico idraulico simulato. L'equazione può essere ulteriormente espansa per incorporare qualsiasi altro tipo di target di calibrazione (flusso, differenze di carico ecc.).

Per la ricerca del valore minimo della funzione obiettivo, il metodo incorporato da PEST (il GML accennato sopra) necessita della determinazione della pendenza della superficie della funzione obiettivo. Tale gradiente è calcolato attraverso la definizione dei coefficienti di sensitività che esprimono l'impatto che una piccola variazione del valore di un parametro comporta sulla soluzione calcolata dal modello (carico simulato). La comparazione si basa sui valori di carico che vengono simulati dato il set di parametri iniziale, mentre la variazione del carico simulato è ottenuta modificando i valori iniziali dei parametri e sottraendo il valore iniziale del target dal nuovo valore ottenuto con i parametri perturbati. Questa operazione è portata a termine perturbando singolarmente

ogni parametro di calibrazione ed eseguendo di volta in volta un nuovo *run* del modello con lo scopo di quantificare le variazioni nella soluzione. Il set dei coefficienti di sensitività (che andranno a costituire la matrice Jacobiana) incorpora le informazioni relative alla pendenza della funzione obbiettivo, sulla base della quale si definiscono le variazioni (upgrade) a cui sottoporre ogni parametro di calibrazione, che portano verso il minimo globale della funzione obbiettivo. Dopo aver aggiornato i parametri di calibrazione viene calcolato il nuovo valore della funzione obbiettivo per poi rieseguire iterativamente l'intero processo appena descritto fino a che uno dei criteri di convergenza non viene infine soddisfatto. A tale riguardo PEST è vincolato da diversi criteri di convergenza, alcuni relativi all'andamento della funzione obbiettivo, altri relativi invece all'entità della variazione dei parametri di calibrazione durante le diverse iterazioni.

5. Risultati

5.1 Ricostruzione della superficie piezometrica

Le misure di soggiacenza della falda e del livello idrometrico del fiume Po sono state utilizzate per ricostruire l'andamento della piezometria dell'acquifero superficiale, tramite software *Surfer*, un programma di mappatura basato su griglia che interpola i dati distribuiti nello spazio XYZ non in maniera regolare in una griglia spaziale regolare; il metodo di interpolazione statistica utilizzato è il Kriging con drift lineare.

I dati utilizzati per la ricostruzione della piezometria fanno riferimento a quelli della campagna di misura del 16 ottobre 2020 (*Tabella 7*), dove, oltre alle misure di livello della falda nei pressi del Padiglione, sono stati misurati i livelli nei piezometri esterni all'area oggetto di studio e di competenza della GTT e ARPA Piemonte (Marconi e Carducci).

	Est (m)	Nord (m)	quota (m)	misura soggiacenza (m)	livello piezometrico (m)
P1	396233.748	4989387.554	231.715	16.460	215.255
P2	396315.642	4989585.246	231.901	16.555	215.346
Р3	396393.138	4989432.234	230.008	15.415	214.593
P4	396425.006	4989545.759	230.450	15.635	214.815
P5	396307.564	4989517.747	223.581	8.325	215.256
P6	396333.806	4989496.084	223.570	8.475	215.095
P7	396347.394	4989470.542	223.568	8.595	214.973
P8	396498.128	4989433.474	218.272	4.200	214.072
Marconi	395846.230	4990140.380	236.790	15.095	221.695
Carducci	395301.200	4988424.800	234.100	12.710	221.390
Ро	396544.850	4989431.740	213.962	0.265	213.697
Balbis	395861.786	4988413.484	213.900	0.265	213.635
new	396391.409	4988817.865	213.809	0.265	213.544

Tabella 7. Campagna di misura del 16 settembre 2020, coordinate plano altimetriche UTM ETRF2000 32N.

La quota del livello idrometrico del fiume fa riferimento al livello misurato sulla sponda del fiume Po nei pressi del Padiglione (Po). Le coordinate plano-altimetriche del punto sono state rilevate dal gruppo di ricerca del prof. Cina, DIATI, che nella campagna del 12 Novembre hanno rilevato le quote altimetriche anche dei piezometri Marconi e Carducci. Al fine di migliorare l'interpolazione dei dati è stato aggiunto un punto fittizio (new) lungo la sponda

del fiume e la misura sul ponte Balbis di cui si aveva a disposizione le coordinate plano-altimetriche.

Coerentemente con quanto notato da studi pregressi e dalle cartografie dell'idrologia dell'area, la falda converge verso l'asse drenante del Fiume Po (Figura 23).

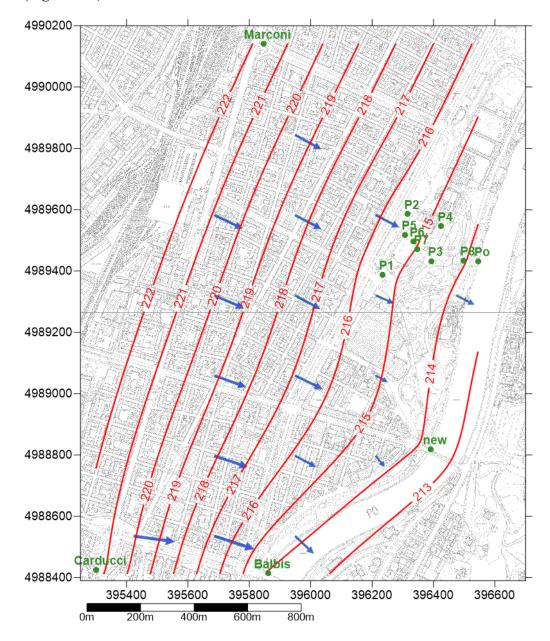


Figura 23.Ricostruzione della piezometria dell'acquifero superficiale, tramite software Surfer11, misure del 16 settembre 2020, sistema di coordinate UTM ETRF2000 32 N.

5.2 Simulazione in regime stazionario

Come già descritto in precedenza, le simulazioni hanno l'obiettivo di ricostruire il campo di moto dell'acquifero superficiale e di verificare la validità, attraverso calibrazione, della distribuzione di conducibilità idraulica assegnata

preliminarmente al modello. Le simulazioni di calibrazione implementate sono allo stato stazionario e i punti di calibrazione sono i piezometri P1,P2,P3,P4,P5,P8,P7,P8 e Marconi.

La *Figura 24* mostra, in blu, l'andamento del carico idraulico simulato tramite modellazione numerica e ottimizzato dalle operazioni di calibrazione, ed in rosso, quello misurato in campo e interpolato con il software *Surfer*.



Figura 24. Andamento del carico idraulico. In rosso le isopieze misurate e interpolate con il software Surfer. In blu le linee di livello della falda calcolate dal software MODFLOW.

I parametri idraulici ottimizzati dal processo di calibrazione hanno restituito i seguenti risultati:

	conducibilità idraulica (m/s)					
	iniziale calibrata					
K1	1.00E-04	1.19E-04				
K2	2.00E-04	2.53E-04				

Tabella 8. Parametri idraulici dell'acquifero calibrati.

Il grafico di *Figura 25* riporta i parametri statistici della calibrazione tramite la differenza tra il carico idraulico misurato e quello simulato. Questo grafico fornisce un'indicazione del grado di approssimazione del modello a quanto osservato in campo. In caso di corrispondenza esatta tra misurato e calcolato i punti si dispongono sulla retta a 45°. In *Tabella 9*, invece, vengono riportati i parametri statistici della calibrazione, in particolare lo scarto quadratico medio normalizzato (*nRMS*) è pari al 1.11 %, segno di un'ottima approssimazione dei dati come illustrato nel capitolo 4.4.

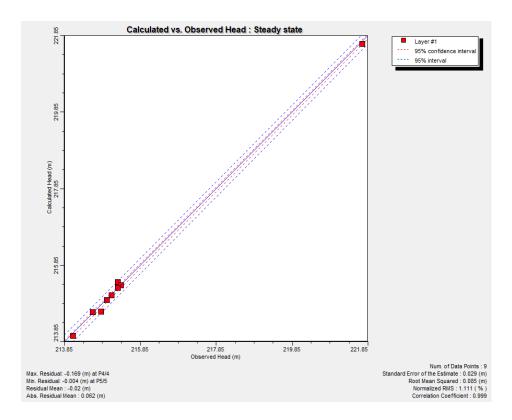


Figura 25. Grafico di confronto tra il carico idraulico calcolato e quello misurato il 16 ottobre 2020.

Parametri statistici	
Errore medio (m)	-0.02
Errore medio assoluto (m)	0.062
Scarto quadratico medio (m)	0.085
Scarto quadratico medio normalizzato (%)	1.11

Tabella 9. Parametri statistici della calibrazione.

Una volta trovati i parametri che meglio approssimano l'acquifero oggetto di studio è stata implementata una seconda simulazione in regime di flusso stazionario, simulando il moto di filtrazione delle acque sotterranee in maniera predittiva così da verificare l'attendibilità del modello (*Figura 26*). I valori di carico idraulico fanno riferimento ai dati misurati il 25 settembre 2019 nei piezometri P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8 (*Tabella 10*). La misura del livello idrometrico del fiume Po è quella registrata in corrispondenza dalla stazione di ponte Vittorio Emanuele II.

	Est (m)	Nord (m)	h(m)
P1	396233.748	4989387.554	215.256
P2	396315.642	4989585.246	215.240
Р3	396393.138	4989432.234	214.556
P4	396425.006	4989545.759	214.785
P5	396307.564	4989517.747	215.214
Р6	396333.806	4989496.084	215.070
P7	396347.394	4989470.542	214.980
P8	396498.128	4989433.474	214.153
Fiume	396544.850	4989431.740	213.650

Tabella 10. Misure del carico idraulico del 25 settembre 2019



Figura 26. Andamento del carico idraulico simulato con quota del fiume registrata il 25 settembre 2019

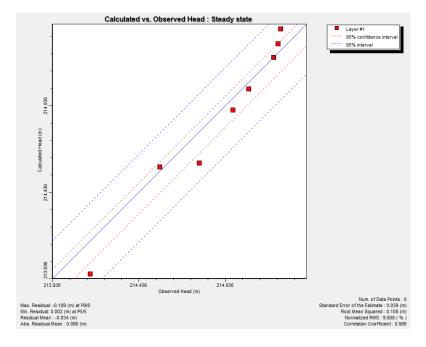


Figura 27. Grafico carico idraulico simulato vs carico registrato il 25 settembre 2019 nei piezometri P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8

Parametri statistici	
Errore medio (m)	-0.034
Errore medio assoluto (m)	0.086
Scarto quadratico medio (m)	0.106
Scarto quadratico medio normalizzato (%)	9.808

Tabella 11. Parametri statistici

Come mostrato nella *Tabella 11*, il residuo medio tra carico misurato e carico calcolato è pari a 0.086 m il che conferma della validità dei parametri calibrati con le misure del 16 ottobre 2020.

5.3 Simulazione in regime transitorio

Le simulazioni in regime di flusso transitorio sono state implementate al fine di simulare il moto di filtrazione delle acque sotterranee durante l'evento di piena monitorato il 25 novembre del 2019 e discusso nel capitolo 2.6.

In questo caso la variazione del livello idrometrico è stata simulata imponendo una condizione al contorno, lungo il fiume, di celle a carico variabile in un intervallo temporale che bene caratterizza l'evento analizzato.

Gli intervalli temporali (stress period) hanno la durata di 4 ore, corrispondenti alla frequenza di acquisizione del dato idrometrico, e il periodo di riferimento va dal 18 novembre 2019 al 18 dicembre 2020, per una durata complessiva della simulazione di 31 giorni (*Figura 28*).

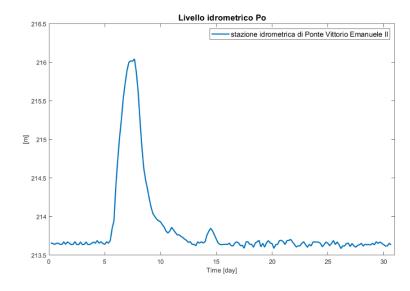


Figura 28. Livello idrometrico del fiume Po registrato alla stazione idrometrica di Ponte Vittorio Emanuele, con frequenza di acquisizione del dato di 4 ore.

I dati utilizzati sono:

- livelli del fiume Po registrati nel periodo di riferimento alla stazione di Ponte Vittorio Emanuele II, con frequenza di acquisizione di 4 ore (*Figura 28*).
- livelli della falda superficiale misurati, nello stesso periodo di riferimento, nei piezometri installati della rete di monitoraggio con frequenza di acquisizione del dato di 30 min e mediato ogni 4 ore.

In mancanza delle misure di soggiacenza della falda durante l'evento di piena nel piezometro di Marconi e per stimare una condizione al contorno di monte che ben rappresenti le condizioni dell'acquifero superficiale, si è misurata la differenza di livello del fiume Po registrata alla stazione idrometrica di Ponte Vittorio Emanuele II il 16 ottobre 2020 e quello misurato sulla sponda del fiume nei pressi del Padiglione lo stesso giorno (*Tabella 12*).

	Ponte Vittorio Emanuele II (m)	Punto di misura vicino al Padiglione (m)	Delta (m)
livello Po	213.910	213.697	0.213

Tabella 12. Differenza di livello del fiume misurata tra la stazione idrometrica di Ponte Vittorio Emanuele II e il punto di misura utilizzato nella campagna del 16 ottobre 2020 per la ricostruzione della piezometria.

Assumendo che questa differenza di livello rimanga costante nel tempo è stata ricostruita la piezometria con i dati misurati nei piezometri P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8 nei giorni antecedenti all'evento di piena e il livello di falda misurato il 16 ottobre nel piezometro Marconi e compensato con il delta calcolato (*Tabella 13*).

	Est (m)	Nord (m)	h(m)
P1	396233.748	4989387.554	215.087
P2	396315.642	4989585.246	215.088
Р3	396393.138	4989432.234	214.373
P4	396425.006	4989545.759	214.626
P5	396307.564	4989517.747	215.050
P6	396333.806	4989496.084	214.884
P7	396347.394	4989470.542	214.800
P8	396498.128	4989433.474	213.983
Marconi	395846.230	4990140.380	221.908

Tabella 13. Misure di livello piezometrico durante i giorni di pre-piena

La *Figura 29* mostra il confronto delle due piezometrie, in nero quella misurata il 16 ottobre 2020 e in rosso quella ricostruita con i dati misurati nei giorni antecedenti alla piena. Esse hanno un andamento simile ma traslato del delta calcolato. Per cui è lecito imporre come condizione di monte del modello di flusso in regime transitorio il valore dell'isopieza 219.797 m.

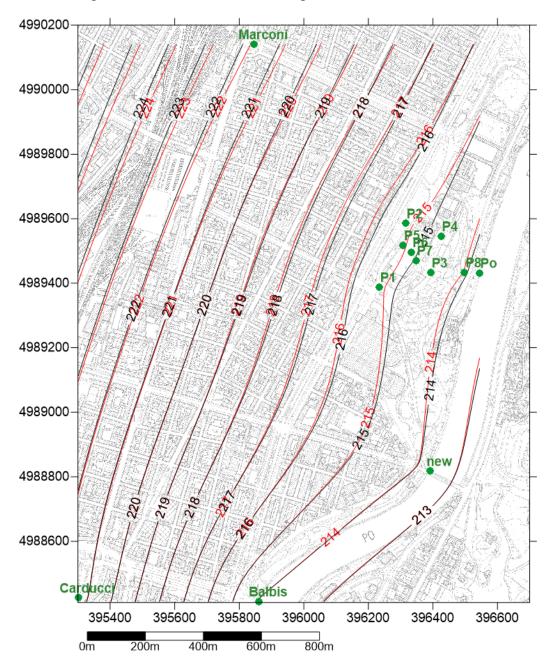


Figura 29. Comparazione piezometrie: in nero le isopieze misurate il 16 ottobre 2020; in rosso le isopieze ricostruite con i dati di pre-piena

Le simulazioni implementate in regime transitorio sono due:

- la prima, in cui sono stati calibrati il coefficiente di immagazzinamento specifico *Ss* e la porosità *n*, utilizzando la distribuzione di conducibilità idraulica calibrata nella simulazione in stato stazionario.
- la seconda, in cui è stata calibrata anche la conducibilità idraulica *K*.

I risultati, di seguito riportati, mostrano l'andamento del carico idraulico simulato e quello misurato nei punti di osservazione durante l'evento di piena.

5.3.1 Simulazione in regime transitorio con calibrazione delle proprietà di immagazzinamento dell'acquifero

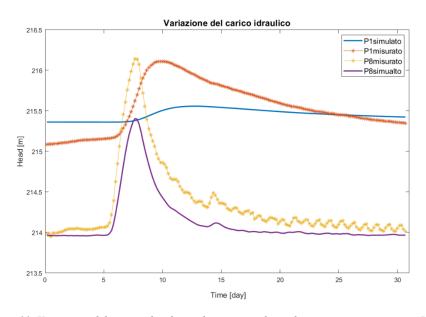


Figura 30. Variazione del carico idraulico nel tempo simulato ed osservato nei piezometri P1 e P8

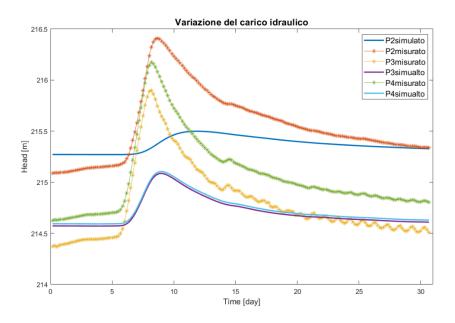


Figura 31. Variazione del carico idraulico nel tempo simulato ed osservato nei piezometri P2,P3,P4.

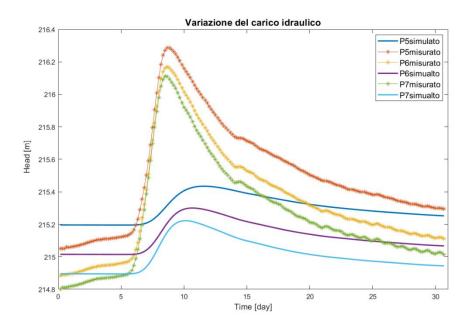


Figura 32. Variazione del carico idraulico nel tempo simulato ed osservato nei piezometri P5/P6/P7

I parametri stimati dalla calibrazione sono riportati in Tabella 14.

Parame	Parametri stimati dalla calibrazione					
Ss 1	Ss 1 1.00E-05					
Ss 2	Ss 2 1.00E-06					
n1	1.02E-01	[-]				
n2	1.00E-01	[-]				

Tabella 14. Parametri idraulici calibrati

I grafici di *Figura 30* mostrano l'andamento del carico idraulico, simulato e osservato, durante l'evento di piena nei punti di osservazione P1 e P8. I due piezometri sono rispettivamente il più lontano dalla sponda del fiume Po e il più vicino. Da questa analisi si può evidenziare come la risposta dell'acquifero all'evento di piena vari oltre che nel tempo anche nello spazio. Infatti, il "picco" di livello in P8 viene raggiunto prima del picco di livello in P1 e si esaurisce rapidamente negli intervalli temporali successivi, mentre la ripresa del livello indisturbato del piezometro P1 impiega un tempo maggiore. Inoltre, nel piezometro P8 si ha un innalzamento del livello di falda maggiore rispetto a P1 a dimostrazione di come nelle zone più vicine alla sponda del fiume la variazione del carico idraulico è più accentuata.

Dall'analisi dell'andamento del carico idraulico nei diversi piezometri si può apprezzare la risposta del modello alla variazione dei livelli del fiume. Per migliorare il fitting tra dati misurati e quelli calcolati è stata fatta una seconda

simulazione in stato transitorio calibrando anche il parametro di conducibilità idraulica dell'acquifero esaminato.

5.3.2 Simulazione in regime transitorio con calibrazione della conducibilità idraulica

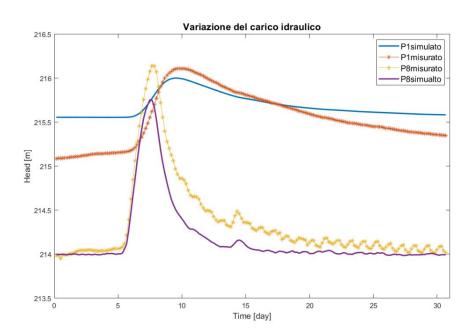


Figura 33. Variazione del carico idraulico nel tempo simulato ed osservato nel piezometro P1 e P8.

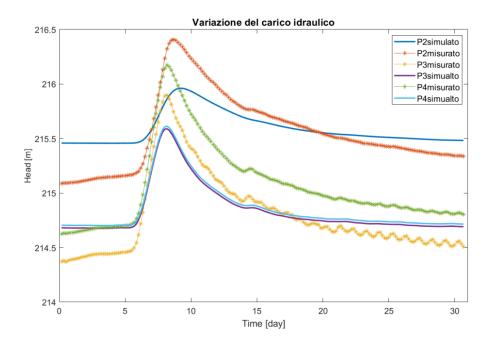


Figura 34. Variazione del carico idraulico nel tempo simulato ed osservato nei piezometri P2,P3,P4.

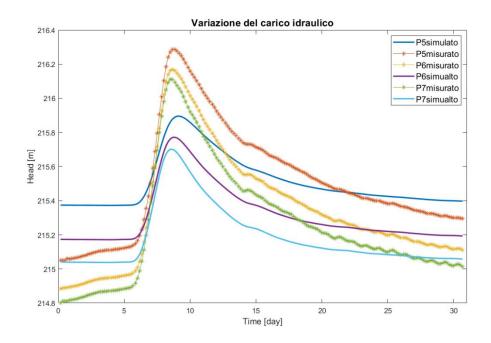


Figura 35. Variazione del carico idraulico nel tempo simulato ed osservato nei piezometri P5/P6/P7

Parametri stimati dalla calibrazione				
K1	K1 5.08E-04			
К2	[m/s]			
Ss 1 1.00E-05		[1/m]		
Ss 2	Ss 2 2.26E-06			
n1	n1 1.11E-01			
n2	1.37E-01	[-]		

Tabella 15. Parametri idraulici calibrati

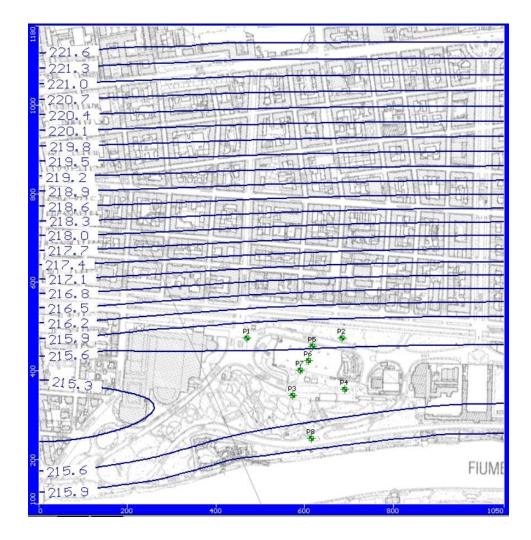


Figura 36. Andamento del carico idraulico nel giorno della piena.

L'andamento del carico idraulico nelle condizioni ordinarie, in assenza di eventi di piena, converge verso l'asse drenante del fiume, mentre in occasione di un innalzamento dei livelli del fiume si ha un inversione del carico idraulico e un aumento del livello piezometrico (*Figura 36*). Dai risultati delle simulazioni in transitorio si evince che le dinamiche dei due corpi idrici sono interconnesse, e quindi alle variazione del livello del fiume corrisponde l'innalzamento o abbassamento del livello della falda.

L'innalzamento della falda simulato nei piezometri P5,P6,P7, posizionati all'interno del Padiglione Morandi (*Figura 33*), durante l'evento di piena risulta essere di circa 1 m raggiungendo una quota massima di 215.9 m. I livelli di falda simulati si mantengono al di sotto della quota di fondazioni di progetto, 217.3 m, di circa 1 m.

Come ulteriore verifica dei valori di conducibilità idraulica è stata implementata un'altra simulazione in stazionario con le condizioni di flusso registrate il 16 ottobre 2020. Di seguito i risultati espressi come andamento del carico idraulico lungo il dominio (*Figura 37*) e grafico di confronto tra i dati calcolati e simulati (*Figura 38*).



Figura 37. Andamento del carico idraulico. In rosso la superficie piezometrica misurata e interpolata con il software Surfer. In blu le linee di livello della falda calcolate dal software MODFLOW

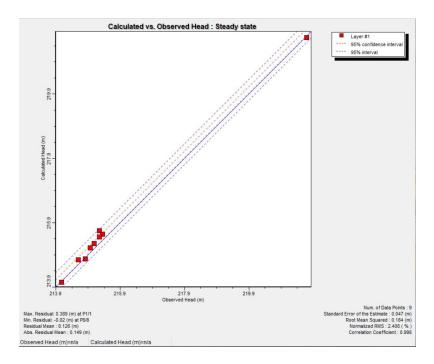


Figura 38. Grafico di confronto tra il carico idraulico calcolato e quello misurato il 16 ottobre 2020.

La *Tabella 16* mostra che la variazione dei parametri idrodinamici dell'acquifero esaminato sono accettabili e che il residuo medio tra carico misurato e carico calcolato è pari a 0.126 m segno di una buona approssimazione dei dati.

Parametri statistici	
Errore medio (m)	-0.126
Errore medio assoluto (m)	0.149
Scarto quadratico medio (m)	0.184
Scarto quadratico medio normalizzato (%)	2.408

Tabella 16. Parametri statistici

Conclusioni

Il presente elaborato di tesi riguarda uno studio finalizzato alla modellazione del flusso sotterraneo di un acquifero superficiale in un'area urbana attraversata da un corso idrico superficiale. In particolare, il modello è stato implementato per lo studio dell'effetto di eventi di piena sull'interazione tra acquifero e corso d'acqua. L'area indagata si posiziona nella città metropolitana di Torino, a destra idrografica del fiume Po. Per la comprensione delle dinamiche del flusso sotterraneo sono state eseguite misurazioni in continuo del livello di falda in piezometri di osservazione, dislocati all'interno dell'area di studio, e del livello idrometrico del fiume. Inoltre, è stata fatta una caratterizzazione del sistema acquifero tramite l'analisi di indagini geognostiche e di prove idrodinamiche. Le simulazioni di flusso implementate hanno simulato il moto di filtrazione all'interno dell'acquifero e dimostrato una forte connessione tra i due corpi idrici. La variazione del livello di falda, nell'area osservata, è direttamente correlata alla variazione del livello idrometrico del fiume Po.

Bibliografia

Anderson, Mary P., and William W. Woessner. "The role of the postaudit in model validation." Advances in Water Resources 15.3 (1992): 167-173.

Bortolami G., Di Molfetta A., "Riqualificazione della centrale frigorifera della sede di corso Galileo Galilei 12. Progetto del Campo Pozzi ad Uso Geotermico".

Bouwer H. e Rice R.C., 1976. "A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells", Water Resources Research, vol. 12, no. 3, pp. 423-428

Cina. A, "La determinazione della posizione dei piezometri al Padiglione Morandi: relazione metodologica e risultati", Torino 6 maggio 2019.

Cooper H.H., Bredehoeft J.D. e Papadopulos S.S., 1967. "Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water", Water Resources Research, vol. 3, no. 1, pp. 263-269.

Di Molfetta Antonio, and Rajandrea Sethi. "Ingegneria degli acquiferi". Springer Science & Business Media, 2012.

Engeler, I., et al. "The importance of coupled modelling of variably saturated groundwater flow-heat transport for assessing river—aquifer interactions." Journal of Hydrology 397.3-4 (2011): 295-305.

Harbaugh, Arlen W. MODFLOW-2005, "the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process". Reston, VA: US Department of the Interior, US Geological Survey, 2005.

Huber, G., Hiller, G., Braune, A., 2003. Concepts of flood control measures for the buildings of free state Saxony in the historical town of Dresden. In: Flood Aftertreatment Groundwater. Proceedings of the Status Workshop, Dresden, pp.57–61 (in German).

Hvorslev M.J., 1951. "Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations", Bull. No. 36, Waterways Exper. Sta. Corps of Engrs, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, pp. 1-50

Hyder, Zafar, et al. "Slug tests in partially penetrating wells." Water Resources Research 30.11 (1994): 2945-2957.

Ing. Aiassa S., Dott. Geol. Antolini F, "Affidamento di attività specialistiche ed indagini geologiche, geotecniche e ambientali propedeutiche alla fase di progettazione di

fattibilità ed a supporto della fase realizzativa di strutture nell'area metropolitana della città di Torino", ATI GEOSOLVING srl – SONDECO srl, Torino marzo 2019.

Ing. Virgilio Anselmo, Tematiche Idrogeologiche; Comprensorio di Torino Esposizioni, "Studio di fattibilità per insediamenti della città e del Politecnico di Torino", rev. 2018.

Kalbus E., Reinstorf F., Schirmer M., 2006, "Measuring methods for groundwater-surfece water interactions: a review", Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 10, pag. 873-887, UFZ Centre for Environmental Research Leipzing-Halle in the Helmholtz Association, Department of Hydrogeology.

Karpf, Christian, and Peter Krebs. "Sewers as drainage systems-quantification of groundwater infiltration." NOVATECH 2004 "Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management", Lyon, Proceedings Vol 2 (2004): 969-975.

Kelman, Ilan, and Robin Spence. "An overview of flood actions on buildings." Engineering Geology 73.3-4 (2004): 297-309.

Kreibich, Heidi, and Annegret H. Thieken. "Assessment of damage caused by high groundwater inundation." Water Resources Research 44.9 (2008).

Lasagna M, De Luca D.A., "Contaminazione da nitrati nelle acque sotterranee della pianura torinese cuneese :quadro generale e ruolo dei corsi d'acqua"/ Giornale di Geologia Applicata 2008,8 (1) 75-87.

Linee Guida SNPA 03.2017, "Criteri tecnici per l'analisi dello stato di monitoraggio dei corpi idrici sotterranei".

Morrison, PR J., and R. N. Taylor. "Foundations in a rising groundwater environment." Groundwater problems in urban areas: Proceedings of the International Conference organized by the Institution of Civil Engineers and held in London, 2–3 June 1993. Thomas Telford Publishing, 1994.

Osenbrück, Karsten, et al. "Sources and transport of selected organic micropollutants in urban groundwater underlying the city of Halle (Saale), Germany." Water research 41.15 (2007): 3259-3270.

Reinstorf, F., et al. "Quantification of large-scale urban mass fluxes of xenobiotics and of the river–groundwater interaction in the city of Halle, Germany." Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 34.8-9 (2009): 574-579.

Rosenberry, Donald O., and James W. LaBaugh. "Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water". No. 4-D2. Geological Survey (US), 2008.

Tesi di laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio
Effetto di eventi di piena sull'interazione tra acquifero e corso d'acqua: simulazione della falda
superficiale nell'area metropolitana di Torino

Schinke, R., et al. "Damage estimation of subterranean building constructions due to groundwater inundation--the GIS-based model approach GRUWAD." Natural Hazards & Earth System Sciences 12.9 (2012).

Springer, R.K. and L.W. Gelhar, 1991. Characterization of large-scale aquifer heterogeneity in glacial outwash by analysis of slug tests with oscillatory response, Cape Cod, Massachusetts, U.S. Geol. Surv. Water Res. Invest. Rep. 91-4034, pp. 36-40.

Tosco T., Sethi R., Accorsi F., "Monitoraggio in continuo del livello di falda nell'area del Padiglione V, Periodo di monitoraggio: 26 settembre 2019- 20 dicembre 2019", Torino 10 febbraio 2020.

Welter, David E., et al. "Approaches in highly parameterized inversion—PEST++ Version 3, a Parameter ESTimation and uncertainty analysis software suite optimized for large environmental models". No. 7-C12. US Geological Survey, 2015.

Winter, Thomas C. "Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems." Hydrogeology Journal 7.1 (1999): 28-45.

Wittenberg, Hartmut, and Hansjörg Brombach. "Hydrological determination of groundwater drainage by leaky sewer systems." Int. Conf. on Water Resources and Environment Research. Vol. 2. Dresden University of Technology, 2002.

Allegato I

Stratigrafie

Sondaggio: S1	Data inizio: 15/04/2019	geosolving		
Committente: Polit	ecnico di Torino	<u>geosolvii ig</u>		
Riferimento: Padiglione V Morandi		Perforazione: Rotazione a carotaggio continuo 101mn		
Località: Viale C. Ce	ppi/Viale Medaglie d'Oro - Torino	Redattore: Dott. Geol. Francesco Antolini		
Impresa Esecutrice	: Sondeco S.r.l.	Foglio stratigrafia 1 di 3		

			,						
Metri perforazione	Profondità m	Colonna stratigrafica	Descrizione litologica (AGI, 1977)	Recupero carota %	Campioni	Prove in foro	Strumentazione in foro / tipo	Falda m	Cassetta catalogagatrici n°
3	0.3 0.75 1.15 1.5 2.2		Asfalto Sottofondo stradale: ghiaie e ciottoli sub-angolosi, grigio scure, sciolte, asciutte. Sabbie, ghiaie e ciottoli poligenici, eterometrici, arrotondati, diametro max 5-6 cm con patine di alterazione biancastre, a luoghi debolmente limose, grigie, sciolte, asciutte. Limi con sabbia, raro ghiaietto e rari ciottoli, diametro max 6-8 cm, colore nocciola, umidi, compatti, con minuti frammenti di laterizi. Ciottoli eterometrici, poligenici, arrotondati, diametro max 8 cm e ghiaia con sabbia debolmente limosa, colore nocciola, sciolti, umidi. Limo con sabbia, raro ghiaietto e rari ciottoli diametro max 6-8 cm con patine di alterazione biancastre (clasti moderatamente alterati) con minuti frammenti di laterizi. colore nocciola, compatto, umido. Ciottoli eterometrici poligenici, arrotondati, diametro max 8 cm e ghiaia in matrice sabbiosa, a luoghi debolmente limosa, colore beige che progressivamente con la profondità vira a grigio, sciolti, asciutti. Tracce di alterazione sui clasti. Tra 2.9 e 3.0 m livello con maggiore matrice limosa più		\$1-C1 -0.9 m \$1-C2 -2.0 m \$1-C3 -4.5 m	SPT -2.0 m 2/5/7 SPT -5.0 m	ubo aperto 3′′		1
6 7 8			compatto. Ciottoli eterometrici, poligenici, arrotondati, diametro max 8/10 cm, e ghiaie in abbondante matrice sabbiosa medio-fine, colore grigio chiaro, addensati, asciutti Da 5.8 m aumento della % di ciottoli ed aumento della pezzatura (diametro max. tagliati da carotiere). Tra 9.3-9.8 m livello con maggiore % di limo e sabbia.		S1-C4 -6.4 m	32/48/R SPT -8.0 m R	Piezometro tubo aperto		2

Profondità sondaggio: 30 m	Perforatrice: CMV MK900GL	Data fine: 18/04/2019
E UTM WGS 84 32N:396233.7	N UTM WGS 84 32N: 4989387.6	Quota: 231.7 m s.l.m.

Sondaggio: S1 Data inizio: 15/04/2019	geosolving
Committente: Politecnico di Torino	<u>geosolvii ig</u>
Riferimento: Padiglione V Morandi	Perforazione: Rotazione a carotaggio continuo 101mm
Località: Viale C. Ceppi/Viale Medaglie d'Oro - Torino	Redattore: Dott. Geol. Francesco Antolini
Impresa Esecutrice: Sondeco S.r.l.	Foglio stratigrafia 2 di 3

Metri perforazione	Profondità m	Colonna stratigrafica	Descrizione litologica (AGI, 1977)	Recupero carota %	Campioni	Prove in foro	Strumentazione in foro / tipo	Falda m	Cassetta catalogagatrici n°
11 12 13			Ciottoli eterometrici, poligenici, arrotondati, diametro max tagliati da carotiere e ghiaie in abbondante matrice sabbiosa media, colore grigio chiaro, poco addensati, asciutti. Presenti livelli con maggiore % di matrice limosa tra 11.0-11.2 m, 13.5-13.7 m. Da 12.0 m circa aumento progressivo della % di matrice sabbiosa media e grossolana e contestuale diminuzione della frequenza e della pezzatura dei ciottoli.			SPT -11.7 m 5/13/24	aperto 3"		3
15	15.3		Tracce di ossidazione su alcuni livelli maggiormente sabbiosi tra 14.6-14.7 m.			-14.0 m 12/26/40	Piezcmetro tubo aperto 3"		
16	18.0		Sabbie medio fini giallastre alternate a sottili livelli cm con matrice limosa da sciolte a poco addensate, dapprima asciutte poi umide e bagnate.			SPT -17.0 m 6/22/27			4
19			Sabbie medio-grossolane con ghiaietto a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro-marrone, da sciolte a moderatamente addensate, bagnate.			LEFRANC 1 da -19.6 a -20.6 m			

Profondità sondaggio: 30 m	Perforatrice: CMV MK900GL	Data fine: 18/04/2019
E UTM WGS 84 32N:396233.7	N UTM WGS 84 32N: 4989387.6	Quota: 231.7 m s.l.m.

Sondaggio: S1 Data inizio: 15/04/2019	geosolving
Committente: Politecnico di Torino	geosolvii g
Riferimento: Padiglione V Morandi	Perforazione: Rotazione a carotaggio continuo 101mm
Località: Viale C. Ceppi/Viale Medaglie d'Oro - Torino	Redattore: Dott. Geol. Francesco Antolini
Impresa Esecutrice: Sondeco S.r.l.	Foglio stratigrafia 3 di 3

Descrizione litologica (AGI, 1977) Bud of graph										
arrotondata a prevalente litologia quarritita, diametro max 3/4 cm, alternate a livelli compath, colore giallastro, da sciolte a moderatamente addensate, bagnate. 22 23 24 25 26 26 26 27 28 28 28 29 20 20 20 20 20 21 22 22 23 24 25 26 27 28 28 28 28 28 28 28 28 28	Metri perforazione	Profondità m	Colonna stratigrafica	Descrizione litologica (AGI, 1977)	-	Campioni		Strumentazione in foro / tipo	Falda m	Cassetta catalogagatrici n°
24 Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 25 26 26 26 27 27 28 28 28 28 29 29 29 29 29 29 29 29 29 29 29 29 29			28.0	Sabbie medio-grossolane con ghiaietto e rari ciottoli						
21 matrice limosa, più compatti, colore giallastro, da sciolte a moderatamente addensate, bagnate. 22 2			0000	arrotondati a prevalente litologia quarzitica, diametro						
21 a moderatamente addensate, bagnate. 22 11/28/37 23 24 Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24 0-25.0 m 25 26 26 2			$-2\pi - 2\pi$	max 3/4 cm, alternate a livelli cm/dm con presenza di						
Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24 25 26 26.2 27 28 Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate. 27 28 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medio-con ghiaia e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensata, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità.			. 0							
Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24 Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 25 26 26.2 27.7 28 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabori) diametro max. tagliati di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 20 21 22 23 24 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabori) diametro max. tagliati di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 20 21 22 23 24 25 26 27 28 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabori) diametro max. tagliati di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 20 21 22 23 24 25 26 27 27 28 27 28 28 27 28 29 29 20 20 20 20 20 20 20 20	21			a moderatamente addensate, bagnate.			11/28/3/			
Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24 Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 25 26 26.2 27.7 28 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabori) diametro max. tagliati di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 20 21 22 23 24 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabori) diametro max. tagliati di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 20 21 22 23 24 25 26 27 28 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabori) diametro max. tagliati di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 20 21 22 23 24 25 26 27 27 28 27 28 28 27 28 29 29 20 20 20 20 20 20 20 20	M I		40.00							
Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24 Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 25 26 26.2 27.7 28 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabori) diametro max. tagliati di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 20 21 22 23 24 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabori) diametro max. tagliati di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 20 21 22 23 24 25 26 27 28 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabori) diametro max. tagliati di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 20 21 22 23 24 25 26 27 27 28 27 28 28 27 28 29 29 20 20 20 20 20 20 20 20	N I		0							
Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24 Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 25 26 26.2 27.7 28 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabori) diametro max. tagliati di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 20 21 22 23 24 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabori) diametro max. tagliati di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 20 21 22 23 24 25 26 27 28 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabori) diametro max. tagliati di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 20 21 22 23 24 25 26 27 27 28 27 28 28 27 28 29 29 20 20 20 20 20 20 20 20	m I		7, 7							
Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24.0-25.0 m Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24.0-25.0 m LEFRANC 2 da -25.2 da -	22		ين ع م ـ							
Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24.0-25.0 m Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24.0-25.0 m LEFRANC 2 da -25.2 da -			05 07 7							
Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24.0-25.0 m Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24.0-25.0 m LEFRANC 2 da -25.2 da -	un i		0 0 o							_
Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24.0-25.0 m Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24.0-25.0 m Lirina con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 25.0 m 26.2 da. 25.3 a. 26.2 m Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate. 27.7 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità.	N I		ئىنىد قاي							5
Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 25 26.2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	23		•							
Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24.0-25.0 m LEFRANC 2 da -3-5.2 a -2-6.2 m Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate. 27.7 28. Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità. 5 PT -28.8 m R 10. EFRANC 3 da -3-2.7 a -2-6.2 m Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate.			9. 6							
Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24.0-25.0 m LEFRANC 2 da -3-5.2 a -2-6.2 m Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate. 27.7 28. Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità. 5 PT -28.8 m R 10. EFRANC 3 da -3-2.7 a -2-6.2 m Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate.										
Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24.0-25.0 m LEFRANC 2 da -3-5.2 a -2-6.2 m Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate. 27.7 28. Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità. 5 PT -28.8 m R 10. EFRANC 3 da -3-2.7 a -2-6.2 m Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate.										
Livelli con ciottoli quarzitici diametro max. 7/8 cm tra 24.0-25.0 m LEFRANC 2 da -3-5.2 a -2-6.2 m Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate. 27.7 28. Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità. 5 PT -28.8 m R 10. EFRANC 3 da -3-2.7 a -2-6.2 m Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate.	N		0000							
25 26.2 26.2 27 28.8 m Serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da Carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità.	24		· · · O · · ·	Livelli con ciettoli cureritici diceretes escu 7/0 cm ter						
25 LEFRANC 2 da -55.2 m SPT -26.2 m SPT -26.2 m -27.7 28 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità.	ni i		No Oo	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						
26.2 Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate. 27.7 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 30 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 31 SFT -28.8 m R 33/R- 46 ARROS 3 46-78.2 8-28.8 m R 30 31 ARROS 3 46-78.2 8-28.8 m R 30	m I		Z-5O	24.0-23.0 111				윤		
26.2 Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate. 27.7 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 30 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 31 SFT -28.8 m R 33/R- 46 ARROS 3 46-78.2 8-28.8 m R 30 31 ARROS 3 46-78.2 8-28.8 m R 30	U I		0.0.					age .		
26.2 Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate. 27.7 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 30 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 31 SFT -28.8 m R 33/R- 46 ARROS 3 46-78.2 8-28.8 m R 30 31 ARROS 3 46-78.2 8-28.8 m R 30	25		0.00					oq		
26.2 Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate. 27.7 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 30 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 31 SFT -28.8 m R 33/R- 46 ARROS 3 46-78.2 8-28.8 m R 30 31 ARROS 3 46-78.2 8-28.8 m R 30	M I		2					o tr		
26.2 Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate. 27.7 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 30 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 31 SFT -28.8 m R 33/R- 46 ARROS 3 46-78.2 8-28.8 m R 30 31 ARROS 3 46-78.2 8-28.8 m R 30	N I		0.0					etu		
26.2 Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate. 27.7 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 30 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 31 SFT -28.8 m R 33/R- 46 ARROS 3 46-78.2 8-28.8 m R 30 31 ARROS 3 46-78.2 8-28.8 m R 30			0.0					ШО2		
27.7 28 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità. Sabbie medio-grossolane con ghiaia e ciottoli arrotondati diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità.	26		0				SPT	P		
diametro max. 4/5 cm a prevalente composizione quarzitica, colore giallastro, addensate, bagnate. 27.7 28 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità. 5PT -28.8 m R	N I	26.2	00.00	Sethin and a consular consular consular control consular						
27.7 28 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità. 29 30 30	M		0.0				33/K-			
27.7 28 Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità. 29 30 30			0.0							
Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità. SPT -28.8 m R	27		000000	, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,						
Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità. SPT -28.8 m R	M		0.0							
Livelli di ciottoli arrotondati, poligenici (quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità. SPT -28.8 m R	N I		00000							6
serpentiniti e metagabbri) diametro max. tagliati da carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità. SPT -28.8 m R		27.7	0.0							
carotiere clasto sostenuti, alternati a livelli di sabbie medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti all'aumentare della profondità. SPT -28.8 m R	28		000000							
medie con ghiaie e ciottoli, colore giallastro beige, molto addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 30 30	N I		82020							
addensati, bagnati in alto e poi via via più asciutti 29 30 30	M		000000							
all'aumentare della profondità. SPT -28.8 m R	n I						a -28.8 m			
R	29		00000	all'aumentare della profondità.						
30			00000							
	N I		000							
	M I		00888							
FINE SONDAGGIO	30		00,000,000							
				FINE SONDAGGIO						

Profondità sondaggio: 30 m	Perforatrice: CMV MK900GL	Data fine: 18/04/2019
E UTM WGS 84 32N: 396233.7	N UTM WGS 84 32N: 4989387.6	Quota: 231.7 m s.l.m.

Sondaggio: S2 Data inizio: 04/04/2019	geosolving
Committente: Politecnico di Torino Riferimento: Padiglione V Morandi	Perforazione: Rotazione a carotaggio continuo 101mm
Località: Viale Medaglie d'Oro/Corso D'Azeglio - Torino	Redattore: Dott. Geol. Francesco Antolini
Impresa Esecutrice: Sondeco S.r.l.	Foglio stratigrafia 1 di 3

Metri perforazione	Profondità m	Colonna stratigrafica	Descrizione litologica (AGI, 1977)	Recupero carota %	Campioni	Prove in foro	Strumentazione in foro / tipo	Falda m	Cassetta catalogagatrici n°
2	1.0 1.7 1.8		Terreno vegetale: limo sabbioso con radici e noduli di CaCo3, sciolto, umido. Limo argilloso con raro ghiaietto e qualche ciottolo subangoloso, diametro max 5 cm, colore nocciola, sciolto, umido. Sabbia con ciottoli poligenici diametro max tagliati da carotiere e ghiaia a luoghi debolmente limosa, presenza di alterazione ed ossidazione, colore nocciola, sciolta, umida. Trovante granitico Sabbia con ciottoli poligenici diametro max tagliati da carotiere e ghiaia a luoghi debolmente limosa. Alterazione ed ossidazione minore rispetto ai livelli soprastanti, colore nocciola, sciolta, umida.		52-C1 -0.6 m	SPT -2.0 m 6/8/7			1
3	2.7		Trovanti di metagabbro/pietre verdi Sabbia con ciottoli poligenici diametro max tagliati da carotiere e ghiaia a luoghi debolmente limosa, alterazione ed ossidazione in rapida diminuzione con la profondità, colore nocciola chiaro, sciolta, umida. Ciottoli eterometrici, poligenici, arrotondati, diametro max 7/8 cm, e ghiaie in abbondante matrice sabbiosa medio-fine, colore grigio chiaro, molto addensati, asciutti.		52-C3	. SPT -5.0 m	exometro tubo aperto 3"		
6					52-C4 -6.5 m	R	Plezo metro t		
9	•					SPT -8.0 m R			2

Profondità sondaggio: 30 m	Perforatrice: CMV MK900GL	Data fine: 10/04/2019
E UTM WGS 84 32N: 396315.6	N UTM WGS 84 32N: 4989585.2	Quota: 231.9 m s.l.m.

Sondaggio: S2 Data inizio: 04/04/2019	geosolving
Committente: Politecnico di Torino	geosolvii g
Riferimento: Padiglione V Morandi	Perforazione: Rotazione a carotaggio continuo 101mm
Località: Viale Medaglie d'Oro/Viale D'Azeglio - Torino	Redattore: Dott. Geol. Francesco Antolini
Impresa Esecutrice: Sondeco S.r.l.	Foglio stratigrafia 2 di 3

Metri perforazione	Profondità m	Colonna stratigrafica	Descrizione litologica (AGI, 1977)	Recupero carota %	Campioni	Prove in foro	Strumentazione in foro / tipo	Falda m	Cassetta catalogagatrici n°
12			Ciottoli eterometrici, poligenici, arrotondati, diametro max 8/10 cm, e ghiaie in abbondante matrice sabbiosa medio-fine, colore grigio chiaro, addensati, asciutti. Tra 10.2-10.5 e 11.9-12.4 m livelli con maggiore % di matrice sabbiosa debolmente limosa.			SPT -11.0 m 47/R -	3~		3
14	15.6		Tra 13.0-13.15 livello con maggiore quantità di ghiaia in matrice sabbiosa limosa/debolmente limosa, colore marrone beige con sottili screziature ocra/arancioni.			SPT -14.0 m 46/38/R	Piezo metro tubo aperto 3″		
16 17 18			Sabbie medio-fini debolmente limose, giallastre/beige alternate a livelli cm con presenza di matrice limosa e rari ciottoli arrotondati a prevalente litologia quarzitica diametro max 2/3 cm, da sciolte a moderatamente addensate, dapprima asciutte poi umide e bagnate. A luoghi sono evidenti livelli con debole arrossamento (ossidazione). I ciottoli nelle porzioni più limose presentano patine di alterazione ocra/arancione o nerastre. Sottile laminazione nei livelli maggiormente limosi.			SPT -17.0 m 13/21/31 LEFRANC 1 da-17.7 a-18.2 m		-16.5 m	4
19						SPT -20.0 m 22/28/30			

Profondità sondaggio: 30 m	Perforatrice: CMV MK900GL	Data fine: 10/04/2019
F UTM WGS 84 32N: 396315.6	N UTM WGS 84 32N: 4989585.2	Ouota: 231.9 m s.l.m.

Sondaggio: S2 Data inizio: 01/04/2019	geosolving
Committente: Politecnico di Torino	<u>gcosorviiig</u>
Riferimento: Padiglione V Morandi	Perforazione: Rotazione a carotaggio continuo 101mm
Località: Viale Medaglie d'Oro/Viale D'Azeglio - Torino	Redattore: Dott. Geol. Francesco Antolini
Impresa Esecutrice: Sondeco S.r.l.	Foglio stratigrafia 3 di 3

Metri perforazione	Profondità m	Colonna stratigrafica	Descrizione litologica (AGI, 1977)	Recupero carota%	Campioni	Prove in foro	Strumentazione in foro/tipo	Falda m	Cassetta catalogagatrici n°
21			Sabbie medie e sabbie fini, alternate a livelli cm/dm con matrice limosa più compatta, colore giallastro, da sciolte a moderatamente addensate, bagnate. Rari ciottoli arrotondati a prevalente litologia quarzitica (presenti anche pietre verdi), diametro max. 2/3 cm.			SPT -20.7 m 11/28/37			
22						LEFRANC 2 da -22.0 a -22.5 m			5
24			Livelli con maggiore quantità di ghiaia e ciottoli quarzitici diametro max. 3/4 cm tra 24.0-24.6 m			SPT -23.5 m 40/R -	to 3′′		
25 26	25.5		Sabbie medio-grossolane con ghiaia e rari ciottoli arrotondati, poligenici, diametro max. 4/5 cm, alternate			LEFRANC 2 da -25.2 a -26.2 m	ezometro tubo aperto		
27			a livelli con maggiore % di matrice limosa, colore beige/ giallastro, addensate, bagnate. Progressivo aumento della quantità e della pezzatura dei ciottoli (8-10 cm) e contestuale aumento del grado di addensamento del deposito. Litologia dei clasti in prevalenza quarzitica, subordinatamente presenti pietre			SPT -26.5 m R LEFRANC 3 da -27.0	þ		
28			verdi. Nei livelli con maggiore quantità di limo presenti screziature della matrice e patine giallastro/ocracee sui clasti. Alcuni clasti risultano inglobati in una matrice limoso-argillosa grigio chiaro.			a -27.5 m			6
30			FINE SONDAGGIO			-29.0 m R			

Profondità sondaggio: 30 m	Perforatrice: CMV MK900GL	Data fine: 10/04/2019
E UTM WGS 84 32N: 396315.6	N UTM WGS 84 32N: 4989585.2	Quota: 231.9 m s.l.m.

Sondaggio: S3 Data inizio: 25/03/2019	geosolving
Committente: Politecnico di Torino	geosolvii ig
Riferimento: Padiglione V Morandi	Perforazione: Rotazione a carotaggio continuo 101mm
Località: Parco Viale C. Ceppi - Torino	Redattore: Dott. Geol. Francesco Antolini
Impresa Esecutrice: Sondeco S.r.l.	Foglio stratigrafia 1 di 3

0.25 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	Ciottoli con clasti da sub-angolosi ad arrotondati, ghiaie e sabbie, con frammenti di laterizi, colore grigio scuro, sciolti, asciutti. Livello di asfalto a 0.25 m. Soletta in cls a 0.6 m. Sabbia con limo, ghiaia e rari ciottoli diametro max 5/6 cm, alterati e con tracce di ossidazione, colore nocciola, debolmente coesiva, umida. Frammenti minuti di laterizi Trovante quaritico. Sabbia media con ghiaia e qualche ciottolo poligenico, diametro max 5/6 cm, alterati e con tracce di ossidazione colore nocciola chiaro, sciolta, leggermente umida.	 53-C1 -1.0 m	SPT		
3 096	X Trovante quarzitico	 53-C2 -2.4 m	-2.0 m 5/3/9		1
0% 3 4 0% 3 5	Ciottoli eterometrici, poligenici, arrotondati, diametro max tagliati da carotiere, con ghiaie in abbondante matrice sabbiosa media, colore grigio/beige nel primo metro e poi grigio chiaro, addensati, asciutti.	S3-C3	SPT -3.0 m	Plezometro tubo aperto 3"	
6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Trovante quarzitico Trovante quarzitico	-5.0 m	30/37/R	Piezometro	
8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Tra 7.7-8.0 m livello con maggiore % di matrice sabbiosa media Tra 9.25-9.6 m livelli con maggiore % di matrice limosa grigia compatta.		SPT -8.2 m 49/R -		2

Profondità sondaggio: 30 m	Perforatrice: CMV MK900GL	Data fine: 29/03/2019
E UTM WGS 84 32N: 396393.1	N UTM WGS 84 32N: 4989432.2	Quota: 230.0 m s.l.m.

Sondaggio: S3 Data inizio: 25/03/2019	geosolving
Committente: Politecnico di Torino	geosolvii g
Riferimento: Padiglione V Morandi	Perforazione: Rotazione a carotaggio continuo 101mm
Località: Parco Viale C. Ceppi - Torino	Redattore: Dott. Geol. Francesco Antolini
Impresa Esecutrice: Sondeco S.r.l.	Foglio stratigrafia 2 di 3

Metri perforazione	Profondità m	Colonna stratigrafica	Descrizione litologica (AGI, 1977)	Recupero carota %	Campioni	Prove in foro	Strumentazione in foro / tipo	Falda m	Cassetta catalogagatrici n°
11			Ghiaie con ciottoli eterometrici, poligenici, arrotondati, diametro max tagliati da carotiere, in matrice sabbioso/ limosa, colore grigio chiaro, mediamente addensate, asciutte. Tra 12.1-12.3 livello con maggiore % di matrice limosa beige con screziature, tracce di ossidazione ed alterazione sui clasti.			SPT -11.0 m 28/37/R			3
13	14.0	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.0	Sabbie medie debolmente limose giallastre/beige, sciolte, prima asciutte poi umide con la profondità.			SPT -14.0 m 10/21/27	Piezometro tubo aperto 3"		
15	15.0		Sabbie medio-grossolane con rara ghiaia e rari ciottoli arrotondati a prevalente litologia quarzitica, diametro max 2/3 cm, sciolte, alternate a livelli cm/dm con maggiore quantità di matrice limosa più compatti, colore giallastro, dapprima umide poi bagnate.				Piezo		
17						SPT -17.0 m 18/20/20 LEFRANC 1 da -17.3 a -17.7 m			4
19						SPT -20.0 m 30/R -			

Profondità sondaggio: 30 m	Perforatrice: CMV MK900GL	Data fine: 29/03/2019
E UTM WGS 84 32N: 396393.1	N UTM WGS 84 32N: 4989432.2	Quota: 230.0 m s.l.m.

Sondaggio: S3 Data inizio: 25/03/2019	geosolving
Committente: Politecnico di Torino	geosolvii g
Riferimento: Padiglione V Morandi	Perforazione: Rotazione a carotaggio continuo 101mm
Località: Parco Viale C. Ceppi - Torino	Redattore: Dott. Geol. Francesco Antolini
Impresa Esecutrice: Sondeco S.r.l.	Foglio stratigrafia 3 di 3

Metri perforazione	Profondità m	Colonna stratigrafica	Descrizione litologica (AGI, 1977)	Recupero carota %	Campioni	Prove in foro	Strumentazione in foro / tipo	Faldam	Cassetta catalogagatrici n°
		0	Sabbie medio-grossolane con rara ghiaia e rari ciottoli				TT		
0			arrotondati a prevalente litologia quarzitica diametro						
N I			max 3/4 cm, mediamente addensate, alternate a livelli						
21		., .	cm/dm con maggiore quantità di matrice limosa						
21			compatta, colore giallastro, screziature nei livelli limosi,	1111					
			bagnate. Tracce di ossidazione in alcuni livelli sabbiosi, sottile laminazione nei livelli limosi.						
0		0	sottile laminazione nei nvein innosi.						
22									
N		16: 1							
									5
0						da -22.5			
23		0. 0				a -23.0 m			
M						-23.0 m			
n I						25/36/45			
24									
N I		0.0					ń		
M I							2		
N		7.7.7		1111			je j		
25							e o		
J	25.2	10/N 27					Piezometro tubo aperto		
N I		-50	Sabbie medio-grossolane e ghiaia con ciottoli arrotondati, poligenici, diametro max. tagliati da carotiere	1111			12		
M I		<u> </u>	a litologia prevalente quarzitica, alternati a livelli			LEFRANC 3	Ĕ.		
26		00000	dm/cm francamente limosi, colore giallastro con			da -25.5 a -26.0 m	jezo		
		100	screziature nei livelli limosi, addensate, bagnate.			SPT	<u>~</u>		
U I		0.0000				-26.0 m 36/R -			
N		5 5 5 6.				30/K-			
27		080000							
		1000							
		30 Ch 110	Trovanti di quarziti e pietre verdi a 27.4 m.						
U I		00	norana ai quaizia e piecie reiul a 27.4 III.						6
28									
		00000		1111					
Ŋ		70.00							
8	28.6	0.000,000	Livello con ciottoli in matrice sabbioso-limosa marrone-	. ; ; ; ; [
	20.7	0.50	rossastra fortemente ossidata	1111		SPT			
29		238	Ciottoli poligenici diametro max. 8/10 cm in matrice			-29.0 m			
M I	29.4	70.20	limoso-argillosa debolmente sabbiosa, grigia, molto						
			addensati, dapprima bagnati e poi umidi.						
			Limo sabbioso-argilloso grigio-beige con noduli con						
30			screziature ocracee e ruggine, compatto, asciutto.	1 1 1 1			<u> </u>		$\vdash \vdash$
			FINE SONDAGGIO	لنننا					

Profondità sondaggio: 30 m	Perforatrice: CMV MK900GL	Data fine: 29/03/2019
F LITM WGS 84 32N: 396393 1	N LITM WGS 84 32N: 4989432 2	Quota: 230.0 m s l m

Sondaggio: S4 Data inizio: 18/03/2019	geosolving
Committente: Politecnico di Torino	geosolvii g
Riferimento: Padiglione V Morandi	Perforazione: Rotazione a carotaggio continuo 101mm
Località: Parco Viale C. Ceppi - Torino	Redattore: Dott. Geol. Francesco Antolini
Impresa Esecutrice: Sondeco S.r.l.	Foglio stratigrafia 1 di 3

Metri perforazione	Profondità m	Colonna stratigrafica	Descrizione litologica (AGI, 1977)	Recupero	Campioni	Prove in foro	Strumentazione in foro / tipo	Falda m	Cassetta catalogagatrici n°
	0.1	200	Terreno vegetale limoso						
M I		, o, o, o	Sabbia con ciottoli e ghiaia debolmente limosa, grigio						
N I	0.6	100-1-00-	beige, sciolta, leggermente umida in alto poi asciutte.						
и .		-X=-X=	Limo con sabbia, rara ghiaia e rari ciottoli, diametro max 5/6 cm, colore nocciola, coesivo, umido. Frammenti di		S4-C1				
1	1.2		laterizi, frustoli carboniosi e radici.		-1.0 m				
M I		0.00.0.000	Ghiaia e ciottoli in matrice sabbiosa debolmente limosa.		2.0				
		9.850	Clasti sub-angolosi nella parte alta prevalentemente						
			quarzitici molto alterati ed ossidati poi arrotondati,						
2			diametro max. 6/8 cm, colore beige, sciolta, asciutta.						
N I		<u> </u>	Con la profondità diminuzione dell'alterazione e graduale						
M I		0 0	variazione di colore verso grigio chiaro.		S4-C2				1
N I		6.6			-2.6 m				
3		° ° °							
	3.3	0 0							
N I	3.3	092:09	Ghiaie con ciottoli eterometrici, poligenici, arrotondati,						
M I		80,00	diametro max tagliati da carotiere, in abbondante						
N a		00000	matrice sabbiosa, colore grigio chiaro, nolto addensate,						
1		00000	asciutte. Ombre di cementazione su alcuni ciottoli.				èn		
n I		0,000					윤		
		000000					훕		
		y 000					8		
5		00000			S4-C3	SPT	exometro tubo aperto		
M I		200			-5.0 m	-5.3 m	L Cal		
N I		000000				R	l i		
M I		00.00					ezo		
6		0% 00					~		
		80.00							
		0% 900							
N I		8250							
7		0%			S4-C4				
•		89,500			-7.0m				
		0.90.0							
		66.00							2
		. 0	Tra 7.7-8.0 m livello con maggiore % di matrice sabbiosa			SPT			
8		000000	media.			-8.2 m			
N I		Owe of the				R			
M I		00000		 					
M I		0,400							
9		00000							
		108 E	Tra 9.25-9.6 m livelli con maggiore % di matrice limosa	 					
		8000	grigia compatta.	 					
M		10000	Bribis compatte.						
10		0,000		 					
10		U. 03 46 9		Liiii					

Profondità sondaggio: 30 m	Perforatrice: CMV MK900GL	Data fine: 22/03/2019		
E UTM WGS 84 32N: 396425.0	N UTM WGS 84 32N: 4989545.7	Quota: 230.4 m s.l.m.		

Sondaggio: S4 Data inizio: 18/03/2019	geosolving
Committente: Politecnico di Torino	geosolvii g
Riferimento: Padiglione V Morandi	Perforazione: Rotazione a carotaggio continuo 101mm
Località: Parco Viale C. Ceppi - Torino	Redattore: Dott. Geol. Francesco Antolini
Impresa Esecutrice: Sondeco S.r.l.	Foglio stratigrafia 2 di 3

Metri	Profondità m	Colonna stratigrafica	Descrizione litologica (AGI, 1977)	Recupero carota%	Campioni	Prove in foro	Strumentazione in foro / tipo	Falda m	Cassetta catalogagatrici n°
11 12 13			Ghiaie con ciottoli eterometrici, poligenici, arrotondati, diametro max tagliati da carotiere, in abbondante matrice sabbioso, colore grigio chiaro, molto addensate, asciutte. Ombre di cementazione su alcuni ciottoli.			SPT -11.0 m R SPT -14.0 m 36/36/38	Piezometro tubo aperto 3"		3
15 16 17 18	15.2		Sabbie medio-grossolane con ghiaia e rari ciottoli arrotondati a prevalente litologia quarzitica, diametro max 2/3 cm, sciolte, alternate a livelli cm/dm con maggiore quantità di matrice limosa più compatti, colore giallastro, dapprima umide poi bagnate. Sottile laminazione nei livelli maggiormente limosi e colore tendente al grigio. Tra 19.0-20.0 m livelli con maggiore quantità di ghiaia e ciottoli diametro max. 4/5 cm a litologia prevalentemente quarzitica.			SPT -17.0 m 8/14/15	ald.	\(\nabla\) -435m	4
20		9 69				SPT -20.0 m 46/50/R	<u> </u>		

Profondità sondaggio: 30 m	Perforatrice: CMV MK900GL	Data fine: 22/03/2019
E UTM WGS 84 32N: 396425.0	N UTM WGS 84 32N: 4989545.7	Quota: 230.4 m s.l.m.

Sondaggio: \$4 Data inizio: 18/03/2019	geosolving
Committente: Politecnico di Torino	geosolving
Riferimento: Padiglione V Morandi	Perforazione: Rotazione a carotaggio continuo 101mm
Località: Parco Viale C. Ceppi - Torino	Redattore: Dott. Geol. Francesco Antolini
Impresa Esecutrice: Sondeco S.r.l.	Foglio stratigrafia 3 di 3

Metri perforazione	Profondità m	Colonna stratigrafica	Descrizione litologica (AGI, 1977)	Recupero carota %	Campioni	Prove in foro	Strumentazione in foro / tipo	Faldam	Cassetta catalogagatrici n°
21			Sabbie medie e grossolane con rara ghiaia e rari ciottoli arrotondati a prevalente litologia quarzitica diametro max 2/3 cm, da leggermente a mediamente addensate, alternate a livelli cm/dm con maggiore quantità di matrice limosa compatta, colore giallastro, screziature nei livelli limosi, bagnate. Sottile laminazione nei livelli limosi.						
22	22.5	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Sabbie medio-grossolane e ghiaia con ciottoli arrotondati, poligenici, diametro max. 5/6 cm a litologia in prevalenza quarzitica, alternati a livelli			SPT -22.5 m 45/R -			5
24			dm/cm francamente limosi, colore giallastro con screziature nei livelli limosi, addensate, bagnate. Sottile laminazione nei livelli limosi.			LEFRANC 2 da -24.0 a -24.3 m	erto 3''		
25 26							Piezometro tubo aperto 3'		
27	27.3		Sabbie medio-grossolane e ghiaia in matrice limosa con			SPT -27.2 m R			6
28	28.6 28.8	×××	ciottoli arrotondati, poligenici, diametro max. 5/6 cm a litologia in prevalenza quarzitica, colore beige/marrone chiaro, addensate, bagnate. Trovante di metagabbro.						
30	29.4	25.0 0.00 20.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1	Ciottoli poligenici diametro tagliati da carotiere in matrice limoso-argillosa debolmente sabbiosa, grigia, molto addensati, dapprima bagnati e poi umidi. Limo sabbioso-argilloso grigio-beige con noduli con screziature ocracee e ruggine, compatto, prima umido poi asciutto. FINE SONDAGGIO			LEFRANC 3 da -29.8 a -30.4 m			

Profondità sondaggio: 30 m	Perforatrice: CMV MK900GL	Data fine: 22/03/2019
E UTM WGS 84 32N: 396425.0	N UTM WGS 84 32N: 4989545.7	Quota: 230.4 m s.l.m.

Sondaggio: S8 Data inizio: 01/04/2019	geosolving
Committente: Politecnico di Torino	geosolvii g
Riferimento: Padiglione V Morandi	Perforazione: Rotazione a carotaggio continuo 101mm
Località: Viale B.Crivelli/Viale Virgilio - Torino	Redattore: Dott. Geol. Francesco Antolini
Impresa Esecutrice: Sondeco S.r.l.	Foglio stratigrafia 1 di 2

Togilo stratigrana 1 di 2									
Metri perforazione	Profondità m	Colonna stratigrafica	Descrizione litologica (AGI, 1977)	Recupero carota %	Campioni	Prove in foro	Strumentazione in foro / tipo	Falda m	Cassetta catalogagatrici n°
	0.05	SEASON OFFI	Asfalto						
1	0.3		Sottofondo stradale: ghiaia e ciottoli a clasti sub-angolosi, grigio scuri, sciolti, asciutti. Sabbie medie e fini con limo, rara ghiaia e qualche ciottolo da arrotondati a sub-angolosi, poligenici		58-C1 -0.8 m				
2	2.6		diametro max. 4/5 cm, colore marrone scuro, sciolte, prima asciutte poi umide. Abbondanti frammenti di laterizi, manufatti metallici, frustoli carboniosi, legno e materiale organico. Da circa 2.3 m circa di profondità scomparsa dei laterizi.		58-C2 -1.7 m	SPT -2.0 m 2/1/4			1
3			Sabbie medie e fini alternate a livelli dm/cm con abbondante matrice limosa, colore beige, sciolte, prima umide e poi bagnate. Nei livelli limosi evidenti sottili laminazioni, screziature ocracee/arancioni e tracce di ossidazione.		-2.6 m				
5					-3.8 m	SPT -5.0 m 5/5/6	tubo aperto 3"	-4.2 m	
	5.8	95-55-5 5	Livello di limo cabbioco gricio con poduli eccaziati			LEFRANC 1 da -5.5	ezometro tu		
b	6.0		Livello di limo sabbioso grigio con noduli screziati (colore ocraceo/arancione) Sabbie medie e grossolane alternate a livelli dm con ghiaia e ciottoli arrotondati a prevalente litologia intrusiva acida e quarzitica, diametro max. 8 cm e livelli			a-6.0 m	Piez		
8		\$0 \$2 \$2	con matrice limosa più compatti, colore beige, addensate, bagnate. Nei livelli limosi evidenti sottili laminazioni e screziature ocracee/arancioni. Abbondanti frammenti cm di legno tra 6.0 e 8.0 m.			SPT -8.0 m 21/33/35			2
9	9.3		Ghiaie e ciottoli arrotondati diametro max. 5/6 cm in matrice sabbiosa-debolmente limosa, colore giallastro,						
10			addensate, bagnate. Alcuni ciottoli sono inglobati in una matrice limoso-argilloso grigia con minuti frammenti fossili. Clasti con patine di alterazione biancastre e ocra.						

Profondità sondaggio: 18 m	Perforatrice: CMV MK900GL	Data fine: 03/04/2019		
E UTM WGS 84 32N: 396498.1	N UTM WGS 84 32N: 4989433.5	Quota: 218.3 m s.l.m.		

Sondaggio: S8 Data inizio: 01/04/2019	geosolving
Committente: Politecnico di Torino	geosolvii g
Riferimento: Padiglione V Morandi	Perforazione: Rotazione a carotaggio continuo 101mm
Località: Viale B.Crivelli/Viale Virgilio - Torino	Redattore: Dott. Geol. Francesco Antolini
Impresa Esecutrice: Sondeco S.r.l.	Foglio stratigrafia 2 di 2

Metri perforazione	Profondità m	Colonna stratigrafica	Descrizione litologica (AGI, 1977)	Recupero	s carota%	Campioni	Prove in foro	Strumentazione in foro/tipo	Falda m	Cassetta catalogagatrici n°
11 12 13	15.6		Sabbie medie prevalenti con rari ciottoli arrotondati, diametro max. 5/6 cm a prevalente litologia intrusiva acida e quarzitica, da sciolte a mediamente addensate, bagnate, alternate a livelli dm di sabbia grossolana con ghiaia e livelli dm/cm con maggiore quantità di matrice limosa. Sottile laminazione, ossidazione e patine ocracee nei livelli con maggiore % di matrice limosa. Livello di ghiaie e ciottoli arrotondati diametro max 3 cm a prevalente litologia quarzitica in matrice sabbiosa media, sciolte, bagnate. Sabbie medie prevalenti con rari ciottoli arrotondati, diametro max. 5/6 cm a prevalente litologia intrusiva acida e quarzitica, da sciolte a mediamente addensate, bagnate, alternate a livelli dm di sabbia grossolana con ghiaia e livelli dm/cm con maggiore quantità di matrice limosa. Sottile laminazione, ossidazione e patine ocracee nei livelli con maggiore % di matrice limosa.				SPT -11.0 m 10/15/22 LEFRANC 3 da-11.3 a-11.7 m	perto 3"		3
14	15.7		Sabbie e ghiaia con ciottoli arrotondati, poligenici,				SPT -14.0 m 12/26/31 LEFRANC 3 da -15.0 a -15.5 m	Piezometro tubo aperto		
17			diametro max. 7/8 cm a litologia in prevalenza quarzitica, alternati a livelli dm/cm francamente limosi, colore giallastro con screziature da ocra a nerastre nei livelli limosi, addensate, dapprima bagnate, umide e poi asciutte con la profondità. Patine di alterazione biancastre su molti clasti, spesso inglobati da una matrice limosa grigio scura-nerastra. Generale aumento della frazione limosa con la profondità. A 16.6 m presente un livello con ciottoli clasto-sostenuti e matrice quasi assente.				SPT -17.0 m 37/R -			4
19			FINE SONDAGGIO							

Profondità sondaggio: 18 m	Perforatrice: CMV MK900GL	Data fine: 03/04/2019
E UTM WGS 84 32N: 396498.1	N UTM WGS 84 32N: 4989433.5	Quota: 218.3 m s.l.m.

Allegato II

Interpretazione degli slug test

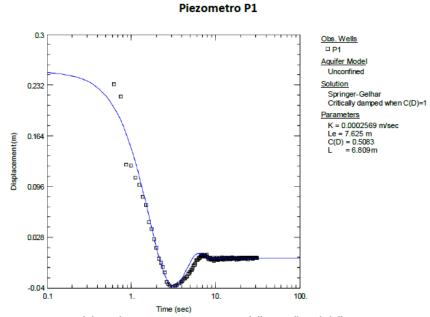


Figura A. 1: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della prima ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P1

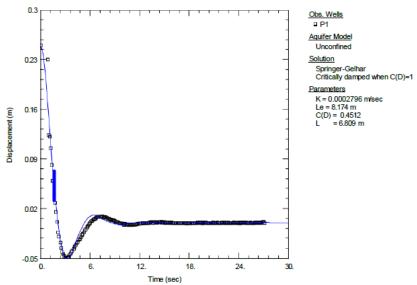


Figura A. 2: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della seconda ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P1

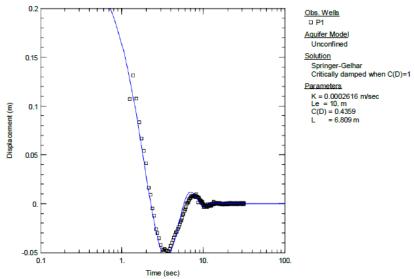


Figura A. 3: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della terza ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P1

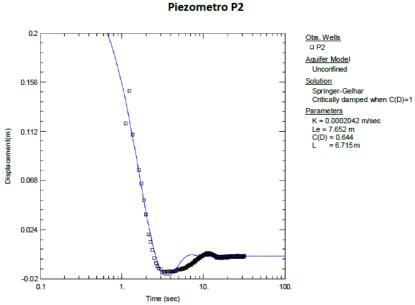


Figura A. 4: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della prima ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P2

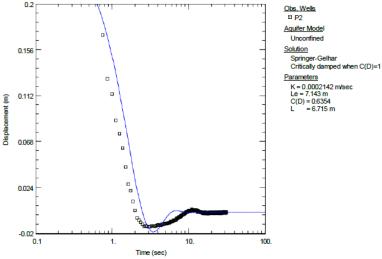


Figura A. 5: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della seconda ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P2

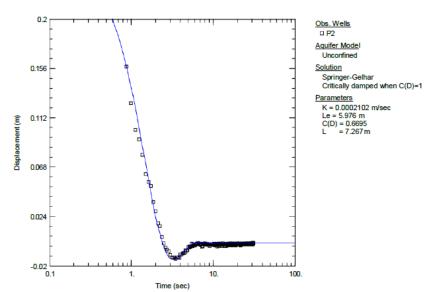


Figura A. 6: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della terza ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P2

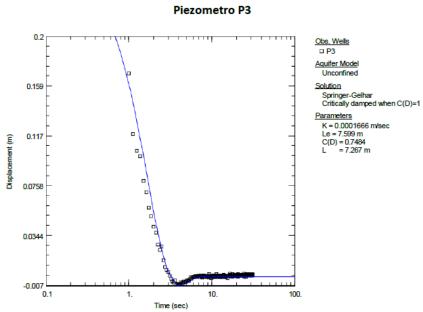


Figura A. 7: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della prima ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P3

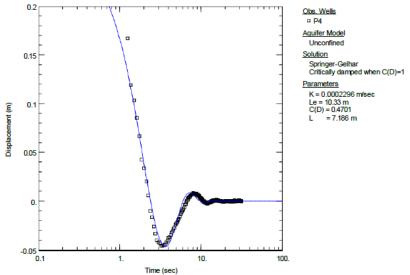


Figura A. 8: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della seconda ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P3

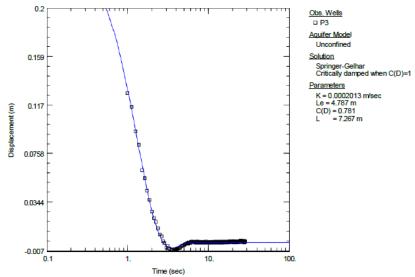


Figura A. 9: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della terza ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P3

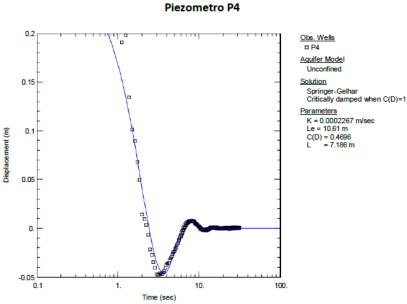


Figura A. 10: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della prima ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P4

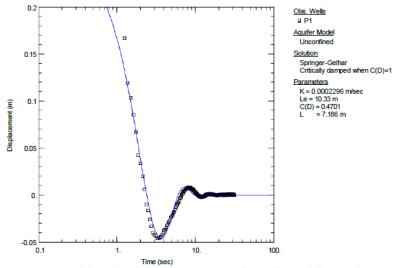


Figura A. 11: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della seconda ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P4

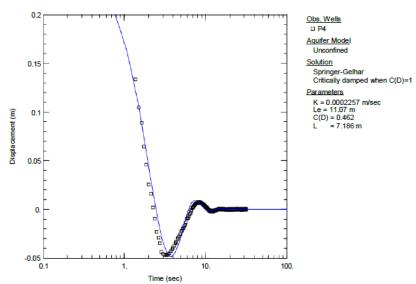


Figura A. 12: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della terza ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P4

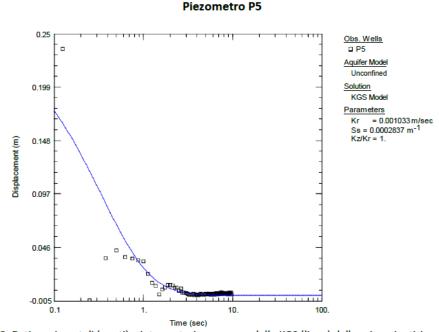


Figura A. 13: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della prima ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P5

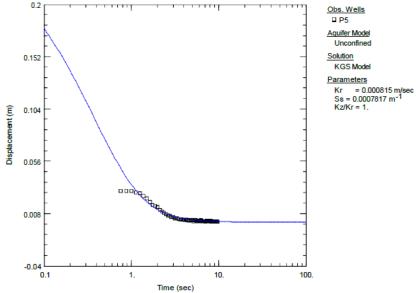


Figura A. 14: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della seconda ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P5

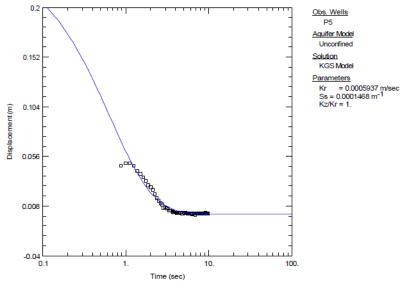


Figura A. 15: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della terza ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P5

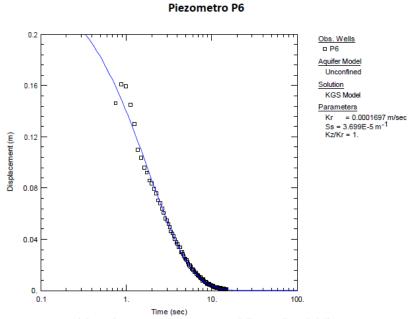


Figura A. 16: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della prima ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P6

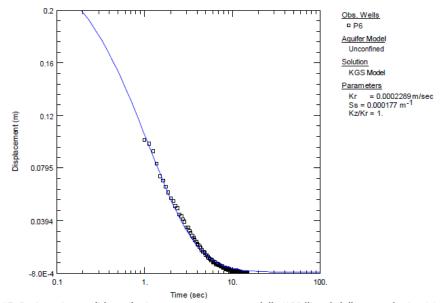


Figura A. 17: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della seconda ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P6

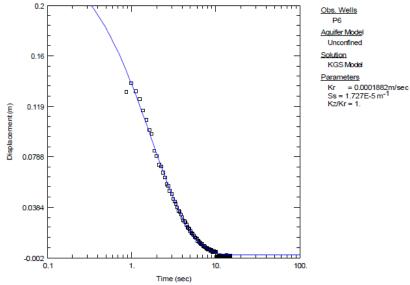


Figura A. 18: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della terza ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P6

Piezometro P7

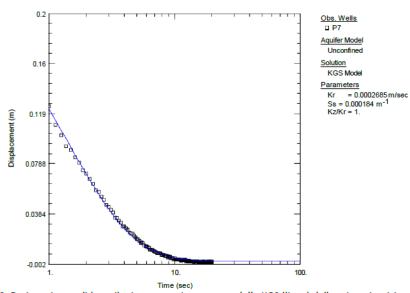


Figura A. 19: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della prima ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P7

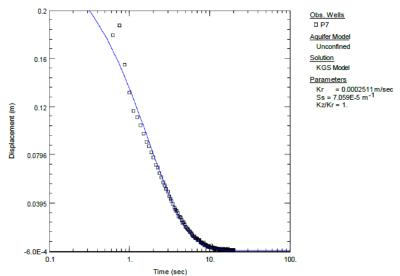


Figura A. 20: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della seconda ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P7

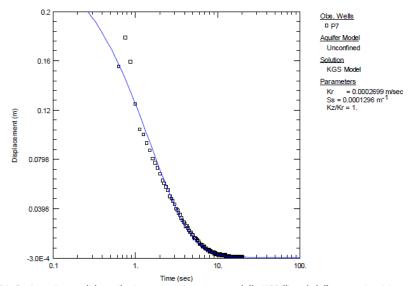


Figura A. 21: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della terza ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P7

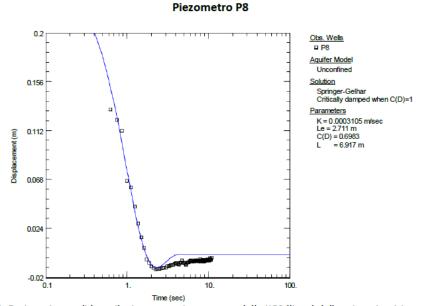


Figura A. 22: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della prima ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P8

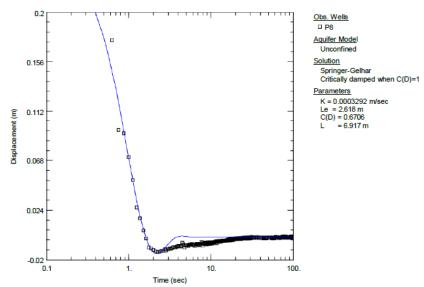


Figura A. 23: Dati sperimentali (punti) e interpretazione con modello KGS (linea) della seconda ripetizione di slug test effettuata nel piezometro P8