

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	11/2013	CONSEGNA		A.Boccato	M.Coccato
1	06/2014	REVISIONE PER RICHIESTE PLIS		A.Boccato	M.Coccato
2	12/2020	AGGIORNAMENTO PROGETTO ESECUTIVO	J.E.Lucca	J.E.Lucca	M.Coccato
3	01/2021	VERIFICA AGGIORNAMENTO PROGETTO ESECUTIVO	J.E.Lucca	J.E.Lucca	S.Fattorelli



OPERE DI LAMINAZIONE DELLE PIENE DEL FIUME OLONA DA REALIZZARE NEI COMUNI DI CANEGRATE (MI), LEGNANO (MI), PARABIAGO (MI), E S. VITTORE OLONA (MI)

AGGIORNAMENTO PROGETTO ESECUTIVO

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:

DOTT. ING. MARCO LA VEGLIA

PROGETTAZIONE:

A.T.I. TECHNITAL S.p.A. – mandataria
BETA STUDIO S.r.l.

AGGIORNAMENTO:

BETA STUDIO S.r.l.

Capo Progetto e Responsabile Integrazione Prestazioni Specialistiche: DOTT. ING. SERGIO FATTORELLI

ELABORAZIONE:

BETA Studio S.r.l.

TITOLO ELABORATO:

STUDI ED INDAGINI
RELAZIONE GEOLOGICA E IDROGEOLOGICA

SCALA:

–

REV.

3

N° ELABORATO:

PE SI GEO 01

NOME FILE:

PE SI GEO 01.doc

DATA:

GENNAIO 2021

INDICE

1. PREMESSA	3
2. OGGETTO E SCOPO	5
3. DESCRIZIONE DELLA DOCUMENTAZIONE DISPONIBILE	6
4. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	8
4.1. Generalità	8
4.2. Caratteristiche dei luoghi interessati dal progetto	9
4.3. Casse di laminazione in sinistra idrografica	10
4.4. Casse di laminazione in destra idrografica	15
5. INDAGINI GEOGNOSTICHE	19
6. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO	23
6.1. Aspetti Geologici	23
6.1.1 Aspetti stratigrafici generali	24
6.1.2 Stratigrafia di riferimento	26
6.2. Aspetti Geomorfologici	30
7. CARATTERISTICHE DEI SUOLI	33
8. IDROGEOLOGIA	36
8.1. Risorse Idriche di superficie	37
8.2. Aspetti Idrogeologici locali	49
8.3. Permeabilità	51
9. SISMICITA'	54
9.1. Pericolosità sismica di base ed azioni sismiche	56
10. IDROGRAFIA	60
11. SEZIONI IDROGEOLOGICHE	62
11.1. Commento alle Sezioni Idrogeologiche	62
12. VERIFICHE DI STABILITA'	65
ALLEGATO 1: Analisi della filtrazione del corpo arginale	71

1. PREMESSA

La presente relazione costituisce parte integrante dell'aggiornamento del progetto esecutivo dell'intervento di realizzazione delle *opere di laminazione delle piene del fiume Olona da realizzare nei comuni di Canegrate (MI), Legnano (MI), Parabiago (MI) e San Vittore Olona (MI)*. In particolare il progetto prevede la realizzazione del Primo Lotto Funzionale, ossia di quelle opere realizzabili con i finanziamenti già disponibili.

L'intervento proposto s'inquadra nel sistema complessivo di opere previste per la messa in sicurezza del territorio situato nel tratto di pianura del fiume, fino alla città di Milano, che prevede la realizzazione di una serie di casse di laminazione lungo il corso del fiume Olona (nel comune di Malnate, nel comune di Lozza, nel comune di Gorla Maggiore e nei comuni interessati dal presente intervento), in grado di mantenere le portate in ingresso in Milano, compatibili con la capacità dell'alveo che, in quel tratto, è tombinato. Si tratta di un intervento finanziato dalla Regione Lombardia ai sensi dell'Ordinanza 3258 del Presidente del Consiglio (dicembre 2002) che affidava incarico alle Regioni interessate dalle esondazioni dei corsi d'acqua, di provvedere "...al ripristino, in condizioni di sicurezza, delle infrastrutture pubbliche danneggiate, alla pulizia ed alla manutenzione straordinaria degli alvei dei corsi d'acqua ed alla stabilizzazione dei versanti, nonché alla realizzazione di adeguati interventi ed opere di prevenzione dei rischi ed alla messa in sicurezza relativa ai dissesti idrogeologici ed al controllo delle piene; ..."; stante il carattere di urgenza, l'ordinanza disponeva inoltre la deroga dalle disposizioni che normalmente regolano la progettazione delle opere pubbliche (es. legge Merloni ecc.).

La prima versione del progetto è stata consegnata nel dicembre 2004, in cui è stato definito l'intervento nel suo complesso. Successivamente, sulla base delle indicazioni pervenute e dei risultati di ulteriori indagini conoscitive avviate, è stata predisposta una variante al progetto: tale Perizia di Variante rappresenta lo sviluppo delle opere di laminazione comprese nel Primo Lotto Funzionale ed è stata approvata nel dicembre 2005 dall'Ente appaltante.

Il progetto dell'intero intervento (primo lotto funzionale e lotto di completamento) è stato quindi sottoposto a procedura di VIA e nel dicembre 2010 la Regione Lombardia ha emesso giudizio positivo alla VIA (Decreto N°12641 del 2 dicembre 2010) con delle prescrizioni. Nel giugno del 2011 è stato quindi consegnato e approvato il progetto definitivo a seguito della Conferenza di Servizi del 1 agosto 2011.

Nel novembre del 2013 è stato consegnato il progetto esecutivo che accoglieva le richieste di modifiche emerse in sede di conferenza dei servizi. Nel giugno del 2014, il progetto è stato rimesso a seguito di incontri avvenuti tra AIPo, rappresentanti dei Comuni, del PLIS (Parco Locale di Interesse Sovracomunale) e gli altri membri della conferenza dei servizi (Regione Lombardia, Consorzio del Fiume Olona, ecc.) in cui sono emerse osservazioni e richieste di modifica alle opere presentate in esecutivo, da parte degli enti elencati.

Infine il presente aggiornamento del progetto esecutivo si è reso necessario a seguito della volontà di AIPo di ottemperare all'adeguamento dei lavori al D. Lgs. 50/2016. In particolare AIPo ha affidato a BETA Studio s.r.l. in data 07/09/2020 l'incarico di aggiornamento del progetto esecutivo realizzato dal Raggruppamento Temporaneo di Imprese costituito da TECHNITAL S.p.A. (capogruppo mandataria) e da BETA STUDIO s.r.l.

La presente relazione geologica ed idrogeologica, redatta con il supporto di studi mirati sul territorio, è stata impostata al fine di ricostruire dettagliatamente gli aspetti naturalistici del territorio ove sono collocate le opere rappresentando analiticamente tutta la gamma di informazioni geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche e geotecniche atte a permettere una corretta progettazione delle opere.

Il documento è stato realizzato sulla base di un'ampia documentazione bibliografica, un rilevamento di campagna ed una specifica apposita campagna di indagini geognostiche in situ.

2. OGGETTO E SCOPO

Oggetto del lavoro è la caratterizzazione geologica, geomorfologia, pedologica ed idrogeologica delle aree di pertinenza dell'opera.

La presente relazione è stata redatta con lo scopo di rappresentare un valido elemento tecnico di supporto alla progettazione delle opere di laminazione delle piene del fiume Olona, delineando un quadro geologico rappresentativo basato su:

- ricostruzione geologica delle aree;
- ricostruzione geomorfologiche delle aree;
- ricostruzione pedologica dei terreni di competenza delle opere;
- caratterizzazione stratigrafica dell'area e definizione di una stratigrafia di progetto;
- ricostruzione ed analisi delle caratteristiche idrogeologiche dell'area;
- caratterizzazione geotecnica dei terreni di competenza delle opere

Inoltre nel capitolo finale e nell'Allegato 1, si riportano le verifiche di stabilità e filtrazione del corpo arginale.

3. DESCRIZIONE DELLA DOCUMENTAZIONE DISPONIBILE

Per la realizzazione del presente lavoro sono stati reperiti e visionati presso Comuni ed Enti Pubblici i seguenti documenti:

- COMUNE DI CANEGRATE (2001) – Piano regolatore generale. Norme tecniche.
- COMUNE DI SAN VITTORE OLONA (1994) – Studio geologico del territorio comunale a supporto del piano regolatore.
- COMUNE DI SAN VITTORE OLONA (1996) – Programma di gestione delle aree a rischio di inondazione: pianificazione degli interventi sul territorio e regolamentazione del suo utilizzo.
- COMUNE DI SAN VITTORE OLONA (1999) – Osservazioni al progetto di piano stralcio per l'assetto idrogeologico (P.A.I.): documentazione tecnica di supporto.
- COMUNE DI PARABIAGO (1995) – Studio geologico del territorio comunale per la formulazione del P.R.G..
- COMUNE DI PARABIAGO (1999) – Studio geologico del territorio comunale per l'integrazione del P.R.G. vigente.
- COMUNE DI PARABIAGO (2003) – Adeguamento dello Strumento Urbanistico Comunale in attuazione del P.A.I. – 2003.
- COMUNE DI LEGNANO (2000) – Studio geologico del territorio comunale a corredo del P.R.G..
- REGIONE LOMBARDIA DG S.P.U. – ARPALOMBARDIA (2004) – Contratto di fiume Olona, Bozzente, Lura.
- AMGA (2003) – Domanda di autorizzazione alla ristrutturazione con approfondimento ed esclusione degli acquiferi vulnerabili del pozzo ad uso potabile di via Cadore in Comune di Parabiago. Studio idrogeologico, idrochimico ed ambientale.
- AMGA – Domanda di autorizzazione alla ristrutturazione con approfondimento ed esclusione degli acquiferi vulnerabili dei pozzi ad uso potabile S. Lorenzo 3 e 4 in Comune di Parabiago. Studio idrogeologico, idrochimico ed ambientale.
- AMGA (2004) – Livelli piezometrici pozzi acqua potabile: Comuni di Legnano e Parabiago.
- AIPO – Progetto delle opere di laminazione delle piene del fiume Olona da realizzare nei Comuni di Canegrate, Legnano, Parabiago e San Vittore Olona - Nota tecnica.
- ERSAF – Carta dei suoli della Regione Lombardia

La documentazione visionata concorda sostanzialmente con quanto riportato in bibliografia per la zona in esame.

Le informazioni stratigrafiche disponibili fanno riferimento a pozzi realizzati in passato nel territorio in oggetto, e a una serie di trincee esplorative eseguite nella primavera estate del 2005, per la cui ubicazione si rimanda alla cartografia geologica ed idrogeologica allegata al progetto.

4. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

4.1. Generalità

L'area di pertinenza delle opere, posta a Nord Ovest di Milano, è individuabile nella porzione occidentale del foglio A5e5 della Carta Tecnica Regionale, scala 1:10.000, e nel foglio 45 "Milano" della Carta Geologica d'Italia scala 1:100.000.

I territori interessati dall'intervento appartengono, per competenza giurisdizionale, alle Amministrazioni Comunali di Legnano, San Vittore Olona, Canegrate e Parabiago. Morfologicamente si estendono all'interno della vasta area continentale, coperta da una continua e potente coltre alluvionale, denominata "Pianura Padana" (vedasi figura 1).



Figura 1 - Inquadramento geografico dell'area

L'area in studio è attraversata dal corso di uno dei principali fiumi della Lombardia, l'Olona.

Il territorio ove si collocano le opere si contraddistingue per una morfologia dolce e pianeggiante, per una diffusa presenza d'acqua regimentata da un'attività puntuale e sapiente durata secoli, e per le ottime caratteristiche dei suoli. Tali aspetti, legati ad un'azione antropica lungimirante, hanno consentito per molto tempo lo svilupparsi di pratiche agricole estremamente produttive. Solo negli ultimi anni l'eccessiva urbanizzazione e industrializzazione che ha sconvolto l'intero territorio milanese ha modificato profondamente la destinazione d'uso di questi territori.

4.2. Caratteristiche dei luoghi interessati dal progetto

Il progetto delle opere di laminazione delle piene del Fiume Olona individua i territori di pertinenza delle opere situati:

- per quanto riguarda la cassa di monte, in destra idrografica, all'interno dei confini comunali di Legnano, Canegrate e San Vittore Olona;
- per la cassa di valle, in sinistra idrografica, nei Comuni di San Vittore Olona e Parabiago.

Si tratta di aree per lo più pianeggianti (vecchie aree di esondazione), adibite ad uso agricolo e coltivate prevalentemente a prato marcitoio e, in misura minore, a mais. Le piante ad alto fusto sono rilevabili soprattutto in corrispondenza dei fossi di irrigazione.

Come si osserva dalla figura 2, inoltre, i territori di pertinenza delle opere sono circondati da vaste aree urbanizzate.

In seguito ad un rilievo effettuato in sito è emerso come la zona abbia subito modellamenti di natura antropica in entrambe le aree, anche se in misura diversa e secondo modalità differenti. Di seguito si procederà alla descrizione dei luoghi in cui saranno realizzate le casse, distinguendo debitamente la zona posta in sinistra idrografica da quella posta in destra.



Figura 2 – Vista dall’alto della zona delle due casse di laminazione.

(Si rimanda alla carta geologica allegata per l’esatta individuazione delle due casse di laminazione.)

4.3. Casse di laminazione in sinistra idrografica

L’area di competenza delle casse di valle (in sinistra idrografica) presenta caratteristiche territoriali e morfologiche notevolmente diverse dall’area circostante. Un ruolo importante nella modellazione del territorio, in questo caso, è stato svolto non solo dalla intensa attività del fiume e dei ghiacciai, che per diverso tempo hanno modellato queste aree, ma anche dalla continua attività dell’uomo che nel corso degli anni ha saputo adattare alle proprie esigenze, con profitto, le caratteristiche peculiari dei luoghi. In questa zona, infatti, per molti anni si è sviluppata un’importante attività imprenditoriale, usufruendo dei depositi di morbida del fiume. L’uomo, utilizzando strumenti rudimentali, ha prelevato e portato alla vicina fornace discrete volumetrie di materiale argilloso, rimodellando così le blande morfostrutture fluviali della zona.

Il territorio di pertinenza delle casse, pertanto, è stato soggetto per molti anni a fenomenologie fluviali (esondazioni), naturali o guidate che garantivano ai cavatori della zona un certo apporto di materiale.

Percorrendo le aree soggette a esondazioni si nota come l’asportazione di terreno abbia modificato in modo rilevante la morfologia. Dal confronto tra le quote rilevate e quelle dei territori limitrofi, in cui non è stato asportato materiale, si nota infatti una differenza variabile tra circa 1 e 2 metri.

Differenze sensibili si notano inoltre tra le aree destinate alle casse di laminazione, riscontrandosi un abbassamento di quota non sempre graduale passando dalla cassa 1 alla cassa 3. La prima cassa presenta quote variabili da 188 m s.l.m.m., nella parte più settentrionale, che diventano circa 186 m s.l.m.m. in corrispondenza del passaggio alla seconda cassa di laminazione, con valori fino a 185 m s.l.m.m. circa. Le quote tendono a diminuire ulteriormente in corrispondenza della terza cassa di laminazione dove si raggiungono i 182 e 183 m s.l.m.m..

Le superfici risultano modellate dalle inondazioni che si sono susseguite nel passato. Osservando attentamente l'intero territorio di pertinenza delle casse è possibile infatti, basandosi sulla morfologia delle aree caratterizzata dalla presenza di blande pendenze e di zone più o meno depresse, ricostruire a grandi linee le direzioni preferenziali di deflusso superficiale. Tali direzioni di deflusso superficiale sono riportate nella Carta Geomorfologica allegata al progetto.

Altre modifiche di natura antropica sono inoltre correlate alla diffusa rete irrigua costituita da canalette artificiali ad andamento rettilineo.

Nelle figure di seguito riportate, che mostrano le situazioni morfologiche in corrispondenza delle casse, è possibile osservare quanto sopra descritto. In particolare nella figura 3, relativa alla parte settentrionale della prima cassa a ridosso della strada provinciale n. 198, è possibile osservare la pendenza del terreno che tende verso la seconda cassa e i dislivelli topografici di natura antropica presenti.

Le figure 4 e 5 rappresentano invece le aree delle casse 2 e 3, e mostrano una leggera depressione in corrispondenza dell'alveo fluviale.

Solo dopo il cambio di destinazione d'uso delle aree (interruzione dell'attività della fornace), l'uomo ha cercato di difendere il territorio modificando le preesistenti strutture di contenimento delle acque fluviali (argini).

Nella figura 6 è possibile osservare come gli argini fluviali siano stati notevolmente innalzati attraverso l'apporto di materiale eterogeneo.



Figura 3 - Zona interessata da asportazione di materiale: esempio di dislivello topografico di natura antropica



Figura 4 - Zona interessata da asportazione di materiale e da innalzamento artificiale dell'argine



Figura 5 - Cassa 3 presso Molino del Miglio - Zona interessata da asportazione di materiale e da innalzamento artificiale dell'argine



Figura 6 - Argine dell'Olona innalzato utilizzando materiale reperito in zona. La linea separa le alluvioni dell'Olona in basso, da una struttura antropica costituita da materiale ghiaioso sabbioso a matrice limosa.(Sinistra Idrografica)

Il territorio di pertinenza delle casse poste in sinistra idrografica dell'Olona è sede inoltre della rete fognaria del Comune di S. Vittore Olona e presenta, nella zona relativa alla

cassa numero 3, un accumulo di materiale di scarto prevalentemente di natura organica (vedasi figure 7 e 8).

Cassa 1 Sin. Idr.



Figura 7 - Manufatti della rete fognaria del Comune di S. Vittore Olona

Cassa 3 Sin. Idr.



Figura 8 - Zona interessata da accumulo di materiale di scarto prevalentemente di natura organica

4.4. Casse di laminazione in destra idrografica

Il settore occupato dalle casse poste in destra idrografica presenta caratteristiche leggermente diverse rispetto a quello in sinistra idrografica. Non è infatti stato interessato, in passato, da attività di cava e più in generale da asportazione di terreno.

L'area si contraddistingue per una natura blanda e pianeggiante con quote pressoché costanti, passanti da circa 192 m s.l.m.m. nella prima cassa posta a nord a circa 189 m s.l.m.m. nel margine meridionale della cassa 3.

In destra idrografica è presente un rete irrigua molto più sviluppata, costituita da fossi profondi anche 1 – 1,5 m (vedasi figure 9 e 10) e da una serie di canalette artificiali ad andamento rettilineo di profondità variabile tra 20 e 40 cm (vedasi figura 11). Spesso le canalette, soprattutto in corrispondenza di strade poderali o vicinali, sono costituite da tubi in gress del diametro di circa 1 m (vedasi figura 12).

Probabilmente la destinazione d'uso dei terreni (prettamente agricoli) ha fatto sì che l'azione antropica in questa zona venisse esplicata soprattutto nella realizzazione di un sistema idraulico riferito alle tipologie di coltivazione. Inoltre l'intersezione tra fossi e canalette, in taluni casi, sembra creare una tipica struttura a maglie quadrate, mentre il flusso dell'acqua nelle canalette è quasi sempre regolamentato da panconature (vedasi figura 13).

Nella parte meridionale della cassa 2, prima del passaggio alla terza cassa, è presente una zona coltivata a mais in cui sono visibili sul terreno ciottoli di dimensioni centimetriche e decimetriche. Data la vicinanza al corso dell'Olona la loro presenza può essere imputabile ad un diverso posizionamento, in passato, dell'alveo fluviale (paleoalveo).

Altri aspetti importanti da non sottovalutare sono la presenza di argini storicamente tracciati dalle piene dell'Olona (vedasi figura 14) e la presenza di strutture abitative anche di pregio storico architettonico ("Mulini Cozzi e Meraviglia").

In base alla morfologia dell'area è stato infine possibile ricostruire anche in questa zona l'andamento delle linee di deflusso superficiale (riferimento: Carta geomorfologica) che mostrano un andamento generale da nord a sud.



Figura 9 - Fosso per irrigazione della profondità di circa 1 metro. (Destra idrografica.)



Figura 10 - Fosso con profondità superiore ad 1 metro. (Destra idrografica.)



Figura 11 - Canalette artificiali ad andamento rettilineo per irrigazione. (Destra idr.)



Figura 12 - Tubo in gress posto al di sotto di una strada sterrata. (Destra idrografica..)



Figura 13 - Panconatura per la gestione della rete idrica. (Destra idrografica.)



Figura 14 - Zona arginale ove sono stati registrati scavalcamenti del fiume Olona.

5. INDAGINI GEOGNOSTICHE

Al fine di approfondire la caratterizzazione geologica, stratigrafica ed idrogeologica dei terreni posti in corrispondenza delle opere, nel periodo compreso fra il 28 giugno ed il 16 luglio 2005 è stata condotta una campagna geognostica articolata attraverso:

- l'esecuzione di n° 4 trincee esplorative;
- il rilievo della stratigrafia dei terreni attraversati;
- il prelievo di campioni rimaneggiati su cui eseguire prove di classificazione in laboratorio.

I lavori sono stati effettuati dallo Studio del Dott. Parmigiani.

Per le trincee si è utilizzato un escavatore gommato Horestein & Hoppel da 150 HP con benna da 1 mc.

Le caratteristiche delle singole trincee sono riassunte in tabella 1 seguente.

	Trincea 1	Trincea 2	Trincea 3	Trincea 4
Dimensioni	5,0 x 3,0 m	6,0 x 3,0 m	5,0 x 2,50 m	4,0 x 2,0 m
Profondità	6,3 m	5,7 m	4,7 m	3,0 m

Tabella 1. Campagna indagini geognostiche. Caratteristiche delle trincee esplorative.

La trincea 1 si trova in sponda sinistra dell'Olonza, a destra del ponte che unisce i Comuni di Canegrando e S. Vittore Olona, in prossimità del Mulino Montoli.

La trincea 2 è ubicata in sponda sinistra dell'Olonza, in prossimità dell'ingresso del Mulino Giulini.

La trincea 3 è ubicata in sponda sinistra dell'Olonza, in prossimità della strada vicinale che conduce ad una ex fornace.

La trincea 4 è ubicata in sponda sinistra del Fiume Olona, nei pressi dell'attraversamento del Fiume della strada Parabiago – S. Lorenzo.

Per maggiori dettagli sull'ubicazione delle prove si rimanda alla carta geologica allegata al progetto.

Le stratigrafie di dettaglio, uno stralcio planimetrico con ubicazione delle trincee, le fotografie dei siti e degli scavi, ed i certificati delle prove di laboratorio sono raccolti nell'elaborato dal titolo: "Campagna di indagini geologico – geotecniche – Relazione tecnica".

Gli scavi in corrispondenza delle trincee hanno attraversato l'orizzonte superficiale maggiormente ricco in sostanza vegetale (denominato livello A), i terreni che si prevede saranno interessati dalla realizzazione delle casse di laminazione (livello B) ed i sottostanti terreni di fondazione (livello C).

Le stratigrafie segnalano la presenza di un orizzonte superficiale, di spessore variabile da 0,3 a 1,7 m, costituito da limo argilloso sabbioso con ghiaia e, almeno nelle porzioni più superficiali, da elementi e frustoli vegetali. Questo strato in corso d'opera dovrà essere asportato e temporaneamente accantonato, per essere poi riposizionato a fine lavori in maniera da garantire una rivegetazione naturale delle aree oggetto degli interventi.

Al di sotto si rileva la presenza di ghiaie sabbiose debolmente limose con ciottoli, che costituiscono sia i terreni oggetto di scavo sia i materiali in fondazione. Il contenuto di limo è variabile e, generalmente, diminuisce con la profondità.

In corrispondenza delle 4 trincee sono stati prelevati 19 campioni rimaneggiati, alcuni dei quali cumulativi (ovvero rappresentativi dell'intera tratta scavata). I campioni sono stati sottoposti ad analisi granulometriche per setacciatura e, sulla componente fine, per aerometria, determinazione del contenuto naturale d'acqua e, ma non per tutti i campioni, limiti di Atterberg.

Nelle analisi granulometriche non è rappresentata la frazione più grossolana (ciottoli) che era comunque presente in valori compresi fra 10% e 17%, con un valore medio del 12%.

La tabella 2 seguente riassume schematicamente i risultati delle analisi condotte.

Trincea	Campione	Profondità campione (m)	Classifica UNI 10006	Umidità (%)	Ghiaia %	Sabbia %	Limo e argilla %	LL (%)	LP (%)	IP
T1	T1-C4	4,00÷ 4,50	A ₂₋₇	12,58	66,29	25,51	8,20	43,46	29,75	13,71
T1	T1-C2	3,00÷ 3,50	A ₂₋₇	12,28	58,85	28,70	12,45	50,24	34,54	15,70
T1	T1-C3	5,00÷ 5,50	A _{1-a}	12,97	52,50	40,73	6,77	25,55	24,75	0,80
T1	T1-C4	2,00÷ 2,50		9,77	62,21	24,18	13,61			
T1	T1-C5	2,00÷ 5,00		18	59,98	26,40	13,62			
T1	T1-C6	6,00÷ 6,50		13,48	43,51	51,00	5,49			
T1	T1-C7	0,00÷ 0,50	>A ₄	25,28	3,39	41,18	55,43			
T2	T2-C1	2,20÷ 2,70		11,57	74,58	16,28	9,14			
T2	T2-C2	3,40÷ 3,90	A _{1-a}	7,63	57,14	38,63	4,23	20,26	18,25	2,01
T2	T2-C3	2,20÷ 3,40		18,12	66,97	27,86	5,17			
T2	T2-C4	0,00÷ 0,50	>A ₄	24,66	34,36	22,34	43,30			
T3	T3-C1	4,00÷ 4,50	A _{1-a}	6,32	67,76	28,34	3,90	21,88	20,25	1,63
T3	T3-C2	3,00÷ 3,50	A _{1-a}	7,73	60,46	35,24	4,30	24,75	21,50	3,25
T3	T3-C3	1,50÷ 3,00		7,49	62,55	30,34	7,11			
T3	T3-C4	1,20÷ 1,70		8,77	63,20	31,88	5,10			
T3	T3-C5	0,00÷ 0,50	>A ₄	27,87	20,59	24,72	54,69			
T4	T4-C1	1,30÷ 1,80	A ₂₋₇	11,25	71,48	19,17	9,35	43,04	24,40	18,64
T4	T4-C2	2,80÷ 3,30	A ₂₋₇	15,63	56,42	32,35	11,23	55,90	40,33	15,57
T4	T4-C3	0,00÷ 0,50	>A ₄	10,55	46,57	18,40	35,03			

Tabella 2. Campagna indagini geognostiche. Riepilogo prove di laboratorio

Dai risultati delle prove sopra esposti si evince quanto segue:

- la frazione fine, passante al vaglio 200, dalle aerometrie risulta costituita da una percentuale circa pari di limo ed argilla;
- i campioni più superficiali (prelevati fra 0,00 – 0,50 m da p.c.) sono costituiti da limi argillosi (quantitativo complessivo variabile dal 35 al 55%) francamente ghiaioso sabbiosi (quantitativo totale variabile dal 75% al 45%);
- al di sotto, e comunque già dalla profondità di 1,5 – 2,0 m da p.c., il litotipo dominante è rappresentato da ghiaie (50 – 60%) sabbiose (20 – 35%), da poco a debolmente limoso argillose (5 – 13%);
- la classificazione CNR UNI 10006 delle ghiaie sabbioso limose, laddove sono disponibili anche i limiti di Atterberg (questa analisi non è stata effettuata su tutti i campioni) è A1-a oppure A2-7. La differenza non è tanto nel contenuto di materiale fine, che è moderatamente variabile, quanto nella relativa plasticità (3 – 15%);

- il contenuto naturale d'acqua nei campioni superficiali (0,00 – 0,50 m da p.c.) è nell'ordine del 25%. Nei campioni granulari è compreso fra 8% – 12%.
- prove di permeabilità diretta in edometro a carico variabile ed in cella triassiale a carico costante, su campione ricostituito passante al setaccio 2mm (ASTM n°10) a composizione sabbioso (79%) limoso (16%) argillosa (5%), mostrano valori di permeabilità nell'ordine di 10^{-7} m/sec.

6. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

6.1. Aspetti Geologici

L'area d'interesse progettuale è interessata da una coltre di depositi alluvionali, in giacitura sub-orizzontale, di età plio-quadernaria ed ambiente marino o continentale, avente spessori nell'ordine di migliaia di metri. Tali materiali, disposti prevalentemente con giacitura monoclinale verso le Alpi, si sono adeguati inferiormente alle superfici morfologiche formatesi nel periodo precedente la trasgressione pliocenica.

Le indagini, effettuate in svariati decenni, solo raramente sono riuscite ad attraversare la spessa coltre pliocenica ed intercettare il sottostante substrato.

I depositi alluvionali in questa porzione di pianura sono rappresentati da potenti sequenze di materiali a prevalente granulometria grossolana, quali ghiaie e sabbie, ed in subordine da depositi fini limoso-argillosi. Non sono presenti grossi trovanti o strati di conglomerato.

I depositi alluvionali mostrano in superficie suoli argillosi a scheletro ghiaioso sabbioso di spessore generalmente modesto.

La presenza di depositi alluvionali, morfologie pianeggianti, elevata antropizzazione, culture in atto e terreno vegetale limitano significativamente i riscontri litostratigrafici di superficie. Ad oggi, l'incisione fluviale dell'Olonza rappresenta il principale spaccato morfo-stratigrafico in grado di fornire informazioni sulle caratteristiche geolitologiche e geomorfologiche del territorio attraversato. Altre informazioni sono ottenibili da scavi di natura antropica, che consentono di riportare temporaneamente a giorno i livelli litologici sepolti, e dalle stratigrafie dei pozzi e sondaggi realizzati in zona.

I depositi alluvionali più superficiali, che interagiscono direttamente con le opere in progetto, sono generalmente di origine fluvio-glaciale con qualche interferenza di episodi di tipo lacustre-palustre. Si tratta, in altre parole, di sedimenti continentali che prendono origine dai fiumi alpini in funzione delle vicende climatiche che si sono susseguite nel Pleistocene (glaciazioni) e nell'Oligocene (avvicendamento di magre e di piene) ed in concomitanza ai movimenti neotettonici che hanno caratterizzato tutto il bacino sedimentario padano.

La carta geologica allegata e la figura 15 riportano l'inquadramento geologico dell'area.

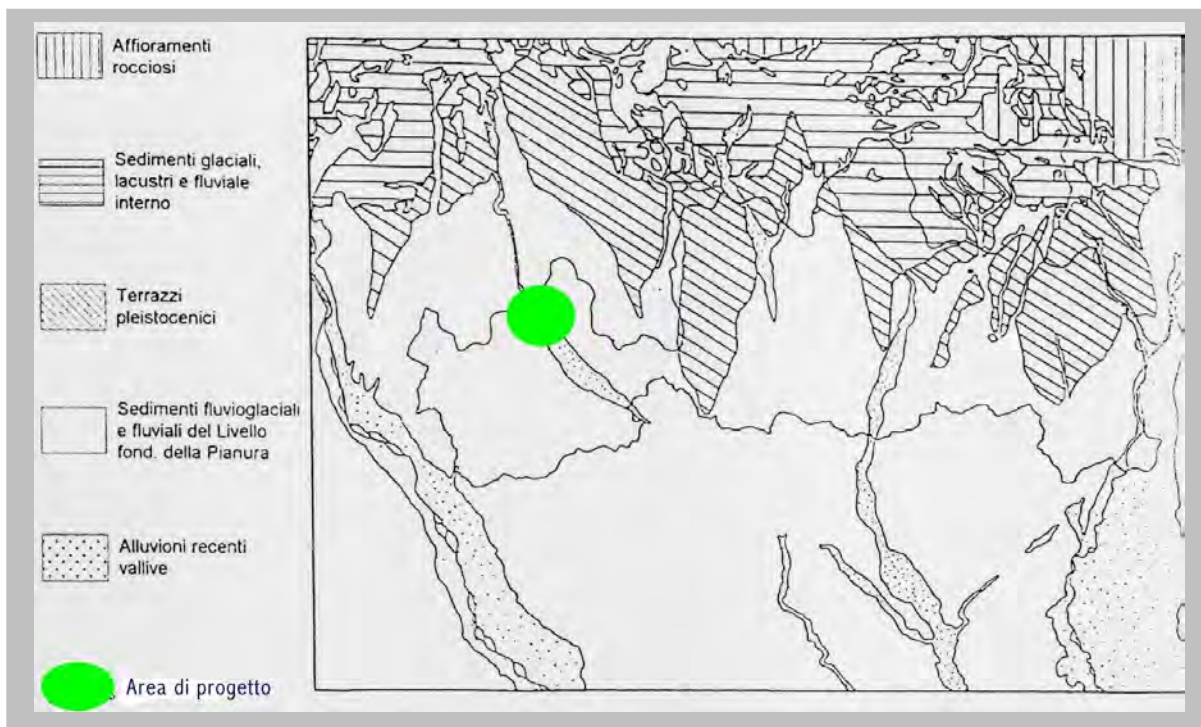


Figura 15 - Inquadramento geologico dell'area di intervento.

6.1.1 Aspetti stratigrafici generali

I terreni di pertinenza delle opere appartengono al Livello Fondamentale della Pianura e sono ascrivibili ai depositi quaternari fluviali e fluvioglaciali, costituiti da sabbie e ghiaie più o meno alterate a seconda dell'età del deposito.

I depositi fluvioglaciali stratigraficamente si contraddistinguono per una serie di sequenze deposizionali legate solitamente a variazioni climatiche a scala regionale. All'interno delle varie sequenze si rilevano talvolta fenomeni deposizionali di secondo ordine. Tali unità stratigrafiche hanno un'estensione notevolmente inferiore alle unità principali, e sono caratterizzate da un insieme di elementi scarsamente organizzati (basso grado di attività pedogenetica).

I terreni alluvionali, invece, distinguibili per la loro posizione altimetrica e per la mancanza di uno strato d'alterazione, si rilevano soprattutto lungo il corso dell'Olna.

Di seguito sono riportate le caratteristiche litologiche delle unità che si rinvennero nell'area.

Depositi marini di transizione

Sono costituiti da una successione di materiali fini, con predominanza di argille grigie e gialle, talvolta torbose, caratterizzate da una discreta continuità laterale. Intercalati nei livelli di materiali coesivi troviamo, a volte, materiali a pezzatura maggiore come sabbie e ghiaie; queste ultime rappresentano la sede degli acquiferi intermedi e profondi, di tipo confinato e/o semi-confinato.

Depositi fluvio-glaciali e fluviali del livello fondamentale della pianura

Sono costituito da ghiaie e sabbie con ciottoli a scarsa matrice limosa argillosa. Si tratta di ghiaie e sabbie eterometriche e poligeniche mediamente alterate in superficie, costituenti banchi a sviluppo irregolare per la presenza di orizzonti interdigitati di varia potenza, e di intercalazioni limose e limoso-argillose. Sono ricoperte talvolta da una sottile copertura colluviale e sono caratterizzate da un suolo ben sviluppato.

Costituiscono l'ossatura del piano generale terrazzato della pianura padana che si spinge con i propri apici confinali nelle valli pedemontane, e si allarga verso sud formando il livello fondamentale della pianura. Il tetto di questa litofacies normalmente risulta caratterizzato dalla presenza di uno strato di alterazione di spessore compreso tra i 25-70 cm; tale strato, di natura limoso-argilloso-sabbiosa, non sempre è rilevabile.

Depositi fluviali recenti

Sono rappresentati da ghiaie e sabbie con ciottoli non alterati, a scarsa matrice limosa. Si tratta di depositi alluvionali post-glaciali costituiti da ghiaie eterometriche e poligeniche e sabbie non alterate in orizzonti interdigitati di varia potenza. Sono ricoperti da un sottile livello di limo colluviale e da un suolo poco sviluppato.

La potenza non supera i 6-8 metri; talvolta ospitano una falda freatica collegata a quella di subalveo e soggetta a forti escursioni annuali

Depositi fluviali attuali

Poco presenti nell'area interessata sono costituiti da ghiaie e sabbie con ciottoli non alterati a scarsa matrice sabbiosa. Si tratta depositi alluvionali relativi ai corsi d'acqua attuali costituiti da ghiaie eterometriche e poligeniche e sabbie non alterate in orizzonti interdigitati di varia potenza. Sono in genere privi di suolo agrario.

La potenza non supera i 4-5 metri.

6.1.2 Stratigrafia di riferimento

In questo paragrafo si è cercato d'individuare una stratigrafia di riferimento, sia per i depositi fluvioglaciali sia per i depositi fluviali recenti dell'Olona, attraverso l'analisi delle stratigrafie dei sondaggi, dei pozzi, studiando alcuni spaccati naturali ed artificiali presenti in corrispondenza delle opere e attraverso le risultanze delle specifiche indagini geognostiche.

Lo studio geologico stratigrafico è stato eseguito soprattutto al fine di caratterizzare, con un buon grado di dettaglio, i livelli deposizionali non saturi interessati direttamente dai lavori, senza perdere di vista i materiali saturi delle unità litologiche sottostanti.

La ricerca effettuata presso Enti pubblici e privati ha portato al reperimento di numerose analisi stratigrafiche, spesso poco dettagliate, eseguite durante la realizzazione di pozzi per acqua. Le stratigrafie dei pozzi, come è noto, perseguono indirizzi diversi da quelli del lavoro in oggetto, ed il carotaggio (a distruzione) limita la validità delle osservazioni stratigrafiche. Come si evince dalla cartografia geologica ed idrogeologica allegata al progetto i pozzi in argomento si trovano in buona parte nei depositi fluvioglaciali del livello fondamentale della pianura, e in misura minore nei depositi fluviali recenti dell'Olona dove, invece ricadono direttamente le opere.

Pertanto le stratigrafie riportate nelle tabelle 3, 4 e 5 sono state ricostruite attraverso uno studio mirato sul territorio integrando i dati forniti dall'ERSAF, le stratigrafie dei pozzi di più recente realizzazione, gli studi eseguiti per i P.R.G. dei Comuni della zona, i dati bibliografici, le osservazioni di campagna e le risultanze delle indagini geognostiche specificamente effettuate nella primavera – estate del 2005 e riassunte nel capitolo 5.

La tabella 3 illustra la stratigrafia dei depositi fluvioglaciali del Livello Fondamentale della Pianura. In questa zona dai dati ERSAF e da piccoli spaccati naturali si evince che il suolo ha uno spessore di 1-1.5 m, mentre solo i primi 30 cm sono interessati dalle radici delle piante. Al di sotto di questo letto a composizione limosa o limoso argillosa a scheletro ghiaioso si rileva, attraverso un passaggio graduale poco caratterizzato, un livello di ghiaia e sabbia immerso in matrice limoso argillosa. A profondità maggiore le caratteristiche litologiche rimangono per lo più invariate, e diminuisce solo la percentuale della componente fine.

Le tabelle 4 e 5 riportano invece le stratigrafie di riferimento per i depositi fluviali recenti dell'Olona, entro i quali ricadono le casse di laminazione in destra e sinistra idro-

grafica. Dai dati ricavati con il rilevamento di campagna, con le stratigrafie dei pozzi e, specialmente, con le trincee esplorative, è emersa una situazione relativamente variabile.

In corrispondenza della cassa situata in destra idrografica, come si evince dalla figura 10, l'analisi di uno scavo di natura antropica ha evidenziato la presenza di un livello superficiale di spessore compreso fra 1,00 – 1,50 m, costituito da ghiaie sabbiose francamente limose, o limoso argillose, con anche frammenti di radici. Seguono ghiaie e sabbie limose passanti, verso il basso, a ghiaie e sabbie debolmente limose con ciottoli.

In corrispondenza della cassa di laminazione situata in sinistra idrografica è stato rilevato un livello superficiale di spessore molto variabile (da un massimo di 1,7 m ad un minimo di 0,3 m) e discontinuo costituito da limi argilloso sabbiosi con frustoli vegetali, passante lateralmente a ghiaie sabbioso debolmente limose. Verso il basso seguono ghiaie e sabbie con limo e ghiaie e sabbie debolmente limose con anche ciottoli. Localmente in alcuni scavi o affioramenti naturali (fossi di drenaggio ed degli argini dell'Olona - vedasi figura 16 -) sono state riscontrate ghiaie sabbiose in abbondante matrice argilloso limosa.

In linea generale all'aumentare della profondità le stratigrafie dei pozzi segnalano una progressiva ed evidente diminuzione della componente fine.

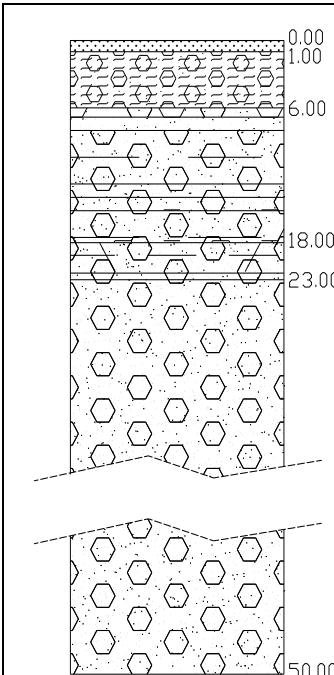
	da (m)	a (m)	litologia
	0.00	1.00	Limo argilloso a scheletro ghiaioso sabbioso.
	1.00	6.00	Ghiaia con sabbia in matrice limoso argillosa
	6.00	18.00	Ghiaia e sabbia in matrice limoso argillosa
	18.00	23.00	Ghiaia e sabbia in matrice limoso sabbiosa
	23.00	50.00	Ghiaia e sabbia debolmente limosa

Tabella 3 - Stratigrafia di riferimento per i depositi fluvioglaciali del Livello Fondamentale della Pianura. La falda è posta a 25 m dal p.c..

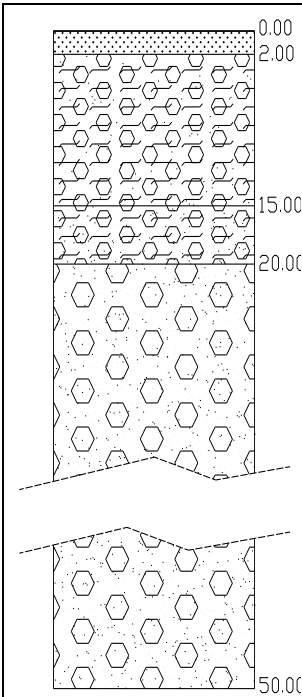
	da (m)	a (m)	litologia
	0.00	2.00	Limo argilloso sabbioso con frustoli vegetali.
	2.00	15.00	Ghiaia sabbiosa con ciottoli e limo
	15.00	20.00	Ghiaia sabbiosa con ciottoli e limo
	20.00	50.00	Ghiaia e sabbia debolmente limosa con ciottoli

Tabella 4 - Stratigrafia di riferimento per le casse poste in sinistra idrografica dell'Olona. La falda è posta a 25 m dal p.c..

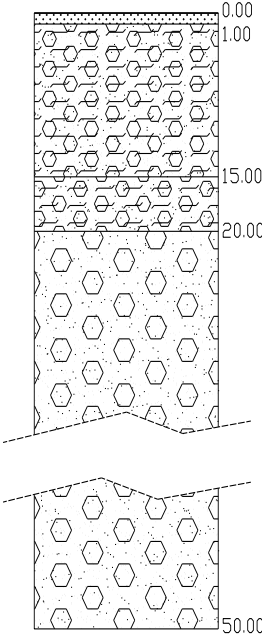
	da (m)	a (m)	litologia
	0.00	1.00	Ghiaie sabbiose francamente limose o limoso argillose.
	1.00	15.00	Ghiaia e sabbia limosa
	15.00	20.00	Ghiaia e sabbie debolmente limosa
	20.00	50.00	Ghiaia e sabbie debolmente limosa con ciottoli

Tabella 5 - Stratigrafia di riferimento per le casse poste in destra idrografica dell'Olona. La falda è posta a 25 m dal p.c.



Figura 16 - Scavo di natura antropica eseguito in corrispondenza del nuovo insediamento abitativo di "Mulino Meraviglia".

6.2. Aspetti Geomorfologici

Lo studio delle caratteristiche geomorfologiche del territorio in studio è stato avviato in prima analisi attraverso rilievi geomorfologici di dettaglio basati sulla cartografica aerofotogrammetrica in scala 1:1.000 e sulla C.T.R. in scala 1:5.000.

I rilievi di campagna sono in seguito stati integrati dall'interpretazione di fotografie aeree.

I fenomeni morfologici interpretati dalle foto aeree sono stati riportati sulla medesima base cartografica dei rilievi geomorfologici di campagna (CTR alla scala 1:10.000 e 1:5.000). I dati scaturiti dalla fotointerpretazione sono stati verificati mediante i rilievi sul terreno.

L'ambito territoriale di interesse progettuale, ove difficilmente si riescono a ricostruire gli aspetti morfologici originali e, di conseguenza, ove difficilmente si riescono a determinare le modalità e le gerarchie che hanno contribuito a modellare il territorio, è inserito nel Livello Fondamentale della Pianura Padana. L'area, caratterizzata da una leggera variazione altimetrica da Nord verso Sud con pendenza regolare intorno al 7 per mille, vede la presenza di un unico elemento morfologico di riguardo, il fiume Olona.

Il corso d'acqua taglia da NW a SE i territori comunali di pertinenza del progetto, con quote altimetriche comprese tra i 190-180 m s.l.m.m.

L'Olona percorre quasi tutto il territorio milanese fino all'abitato di Lucernate di Rho con un andamento Nord-Ovest/Sud-Est, per poi orientarsi secondo una direttrice Est-Ovest. Più a Sud dell'area di progetto riceve le acque del torrente Bozzente e del torrente Lura. Probabilmente nel corso della sua storia geologica è stato un elemento morfodinamico fondamentale per la modellazione del territorio.

Altri elementi morfodinamici che probabilmente hanno contribuito alla caratterizzazione e modellazione delle aree, sono i ghiacciai e le antiche divagazioni dei corsi d'acqua, non più identificabili e talora ancora sede di colatori.

La zona, caratterizzata da un assetto uniforme ed omogeneo, è situata in corrispondenza della media pianura alluvionale, in quella porzione di territorio definita "irrigua" a causa delle storiche, intense irrigazioni artificiali ad uso agricolo.

L'intensa antropizzazione ha notevolmente modificato le caratteristiche morfologiche originarie del territorio, livellando le lievi ondulazioni preesistenti e mascherando in genere la presenza di alcune strutture a terrazzi presenti lungo il corso del fiume.

In alcune zone sono state evidenziate sovrapposizioni tra i fenomeni di tipo antropico e quelli riferibili allo scorrimento delle acque superficiali.

Talora la vicinanza di più fenomeni non può essere rappresentata in cartografia in maniera adeguata. Si è ritenuto quindi di dare maggiore importanza al processo morfogenetico che ha agito in maniera più rilevante.

L'area in cui saranno realizzate le casse di espansione del Fiume Olona rappresenta una valle originata e modellata da un sistema fluviale anastomizzato. Sono presenti, infatti, alcune tracce di corsi fluviali estinti, a livello della pianura o leggermente incassati, che si sviluppano sia in sinistra sia in destra idrografica e che testimoniano le divagazioni che ha subito in passato il corso del fiume Olona, spesso anche in funzione di interventi di natura antropica.

I paleoalvei, individuati attraverso il rilievo effettuato in sito e mediante l'analisi di foto aeree, hanno andamento NW-SE. Mantengono pertanto l'allineamento con l'attuale corso dell'Olona.

Dalla Carta Geomorfologica l'ubicazione dei paleoalvei sopra citati ne evidenzia la disposizione proprio in corrispondenza delle casse di laminazione in progetto. Le informazioni ricavate consentono di affermare che la zona di competenza dei paleoalvei è stata in passato, per scopi industriali, quella maggiormente interessata dal modellamento antropico.

La Carta Geomorfologia evidenzia le aree che hanno subito asportazione, ad opera dell'uomo, di vari quantitativi di materiale argilloso da utilizzare nella vicina fornace. La testimonianza, inoltre, che il corso del fiume ha cambiato percorso anche negli "ultimi anni" è fornita dalla presenza di due mulini, uno di fronte all'altro ("Mulino Cozzi" e "Mulino Meraviglia"), e dal fatto che l'alveo fluviale attualmente lambisce solo la parte posteriore del Mulino Meraviglia, senza interagire con la pala del "Mulino Cozzi".

Le indagini eseguite in sito hanno inoltre mostrato la presenza di scarpate delimitanti terrazzi fluviali. L'altezza delle scarpate nella zona investigata può ritenersi generalmente inferiore ai 5 m.

Altri aspetti importanti da evidenziare nella ricostruzione delle forme che caratterizzano la zona delle casse di laminazione sono le presenze, lungo il corso del fiume, di strutture arginali innalzate dall'azione antropica e di tratti di alveo quasi o completamente cementati.

Dalle foto aeree del sito appare un'area, situata circa in corrispondenza della terza cassa in sinistra idraulica, maggiormente riflettente, ossia chiara, fatto questo che segnala la presenza di materiale più granulare rispetto alle aree circostanti. Ed infatti le trincee esplorative (n° 3 e n° 4) ubicate in questa zona segnalano uno spessore del livello superficiale limoso argilloso assai più contenuto se non assente. Tale contesto è riconducibile al prelievo di materiale argilloso al fine di alimentare la fornace locale.

L'area rimodellata a causa degli scavi è tuttavia percentualmente limitata, mentre in senso generale si può affermare che il territorio di pertinenza delle opere è stato frequentemente ed estesamente interessato dalle esondazioni del fiume. Questo fatto ha notevolmente influenzato l'uso del suolo destinando le aree ad un'economia prevalentemente agricola. Il paesaggio è pertanto caratterizzato da una fitta rete di rogge e di canali irrigui, tipica dell'ambiente rurale, i cui elementi principali sono riportati in carta.

7. CARATTERISTICHE DEI SUOLI

I terreni interessati dal progetto interessano aree subpianeggianti leggermente terrazzate appartenenti al fondovalle del fiume Olona, in passato irrigate. I terreni presenti sono quelli riferibili ai depositi fluvioglaciali recenti del Fiume Olona. Stratigraficamente ad un primo livello di valore pedologico costituito da limi argilloso sabbiosi, o ghiaie limoso sabbiose, di spessore variabile fra 0,30 – 1,70 m, seguono ghiaie e sabbie da limose a debolmente limose con ciottoli.

I suoli di queste aree (mollisols), arricchiti di sostanza organica, scuri e in genere ben strutturati, sono generati dallo sviluppo di processi di arricchimento legati alla frequente presenza dell'acqua che rallenta la demolizione della sostanza organica, permettendone la riorganizzazione in complessi argillo-umici stabilizzati dal calcio. Altra caratteristica che contraddistingue le aree di questa zona è l'uso del suolo a prato stabile o marcitoio; solo in rari casi il suolo di queste aree viene utilizzato per la coltura del mais.

Le caratteristiche peculiari dei suoli lungo fondovalle del fiume Olona sono, in senso generale: spessore da sottile a moderatamente profondo, scheletro comune, abbondante in profondità; tessitura moderatamente grossolana, reazione subacida o neutra, saturazione bassa o media, permeabilità da moderata a moderatamente elevata e drenaggio buono. I dati sopra riportati sono riferiti alla classificazione riportata all'interno del "Progetto <<Carta Pedologica>> i suoli della pianura Milanese settentrionale (ERSAF 1999) di cui alla tabella 6.

E' necessario comunque ricordare che in prossimità delle casce di laminazione poste in sinistra dell'Olona è possibile osservare spaccati naturali che indicano la presenza di un suolo, forse poco strutturato, ma localmente superiore al metro di spessore.

Permeabilità - Conducibilità idraulica – (m/s)		SCHELETRO: Quantità (in %)		PROFONDITÀ DEI SUOLI: (cm)	
<i>Elevata</i>	$>10^{-4}$	<i>Assente</i>	< 1	<i>Molto sottili</i>	< 25
<i>Mod. elevata</i>	$10^{-4} - 10^{-5}$	<i>Scarso</i>	1- 5	<i>Sottili</i>	25 - 50
<i>Moderata</i>	$10^{-5} - 10^{-6}$	<i>Comune</i>	5 – 15	<i>Poco profondi</i>	50 – 75
<i>Mod. bassa</i>	$10^{-6} - 10^{-7}$	<i>Frequente</i>	15 – 35	<i>Mod. profondi</i>	75 – 100
<i>Bassa</i>	$10^{-7} - 10^{-8}$	<i>Abbondante</i>	35 – 70	<i>Profondi</i>	100 – 150
<i>Molto bassa</i>	$<10^{-8}$	<i>Molto abb.</i>	> 70	<i>Molto profondi</i>	> 150

	DRENAGGIO	
1	RAPIDO	L'acqua è rimossa dal suolo molto rapidamente. I suoli sono soggetti a forti deficit idrici.
2	MOD. RAPIDO	L'acqua è rimossa dal suolo in tempi brevi, tali da generare saltuari deficit idrici
3	BUONO	L'acqua è rimossa dal suolo prontamente ma non rapidamente, ed è disponibile per le piante per la gran parte della stagione di crescita.
4	MEDIOCRE	In alcuni periodi l'acqua è rimossa lentamente, per cui il profilo risulta bagnato in qualche periodo durante la stagione di crescita
5	DRENAGGIO LENTO	L'acqua è rimossa lentamente ed il suolo è bagnato per periodi significativi durante la stagione di crescita delle piante. L'umidità limita la crescita e lo sviluppo di alcune piante, in assenza di interventi di drenaggio artificiale
6	DRENAGGIO MOLTO LENTO	L'acqua è rimossa così lentamente che il suolo è saturo periodicamente durante la crescita delle piante o rimane bagnato per lunghi periodi. La falda giunge spesso in superficie o in prossimità di essa, e permane abbastanza a lungo da non permettere la crescita della maggior parte delle colture mesofitiche durante lo sviluppo vegetativo, a meno che il suolo non venga drenato artificialmente
7	DRENAGGIO IMPEDITO	L'acqua è rimossa dal suolo così lentamente da far permeare la falda in superficie durante la maggior parte del periodo di crescita delle piante; la maggior parte delle colture mesofitiche non può crescere a meno che non si intervenga con drenaggi artificiali

Tabella 6 - Caratteristiche dei suoli da “Progetto <<Carta Pedologica>> I suoli della pianura Milanese settentrionale (ERSAF 1999).

La carta riportata in figura 17 evidenzia come i suoli delle aree di pertinenza del progetto, a composizione prevalentemente granulare, abbiano moderata capacità protettiva nei confronti delle acque presenti nel sottosuolo. Allo stesso tempo bisogna ricordare che, in taluni settori della zona, soprattutto nelle aree maggiormente esposte alle esondazioni del fiume Olona, si è provveduto per diversi anni ad asportare la parte più superficiale (argillosa) di questi suoli per utilizzarla nell'industria dei laterizi da costruzione.

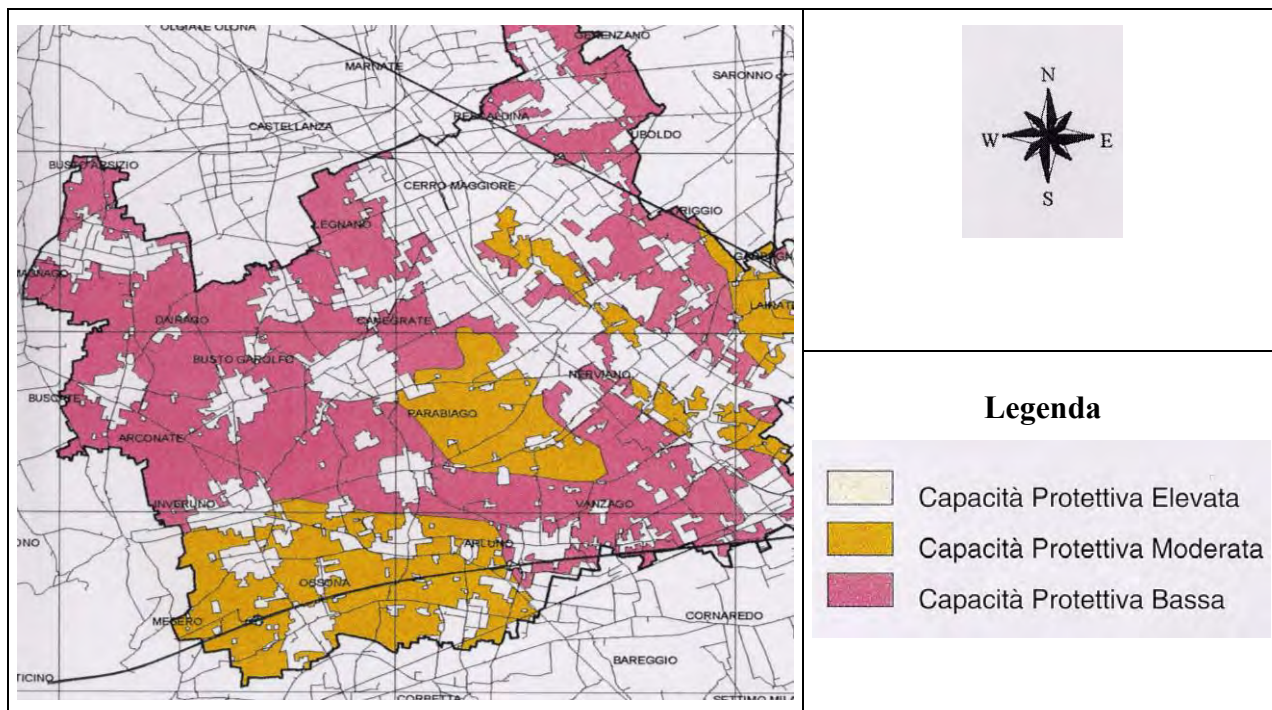


Figura 17 - Carta della capacità protettiva dei suoli per acque profonde nei confronti degli agenti inquinanti

8. IDROGEOLOGIA

Le acque d'infiltrazione efficace sono soggette ad una circolazione sotterranea molto complessa, con percorsi che variano soprattutto in relazione alle caratteristiche idrogeologiche dei diversi acquiferi ed ai loro diversi rapporti geometrici.

L'ambiente naturale in cui è prevista la collocazione delle opere è rappresentato da un sottosuolo arricchito dai contributi idrici forniti dalle precipitazioni palesi ed occulte, dalle infiltrazioni in corrispondenza dei corsi d'acqua naturali e artificiali, e dai notevoli flussi sotterranei provenienti dalle aree pedemontane.

Il sottosuolo della Provincia di Milano (nel settore di pianura) è generalmente suddiviso in tre distinte entità idrogeologiche, separate fra loro da strati argillosi più o meno impermeabili. In tutti i casi lo strato superiore, corrispondente ai depositi fluvioglaciali superficiali ("unità ghiaioso-sabbiosa"), è "ricaricabile" anche localmente dalle acque meteoriche; i livelli più profondi sono alimentati prevalentemente dai flussi idrici sotterranei.

Nell'intera Provincia di Milano si possono quindi riconoscere tre diverse Litozone (Litozona ghiaioso-sabbiosa, Litozona sabbioso-argillosa, Litozona argillosa), mentre le indagini effettuate nelle aree prossime a quella in studio hanno evidenziato la presenza delle seguenti Unità idrogeologiche:

- Unità Ghiaiosa sabbiosa, o Unità idrogeologica superficiale. Ascrivibile alla prima delle tre litozone individuate nel territorio milanese (ne costituisce lo strato superficiale), questa unità, a volte compartimentata per la presenza di interstrati fini, presenta uno spessore variabile da un minimo di 70 m a Nord ad un massimo di 100 m a Sud Ovest. La compartimentazione dell'acquifero è legata alla presenza, a varie profondità, di banchi argillosi di continuità laterale variabile. Gli strati a maggiore permeabilità sono essenzialmente costituiti da ghiaia e sabbia. E' maggiormente nota come acquifero tradizionale.
- Unità idrogeologica profonda. Anch'essa appartenente alla litozona ghiaioso-sabbiosa ed è costituita da una successione, pur con spessori molto variabili, attribuibile al Pliocene medio. L'unità, delimitata alla base da una "litozona argillosa", con profondità variabile, che costituisce lo strato impermeabile, è sede di diversi livelli acquiferi confinati o semiconfinati, indicati univocamente come "Secondo acquifero".

L'area di competenza del progetto presenta caratteristiche idrogeologiche unitarie, con saturazione da falda freatica a circa 20-30 di profondità. Come già accennato la presenza della falda freatica nel sottosuolo padano è alimentata dalla filtrazione attraverso le formazioni pedemontane superficiali permeabili fino al substrato pliocenico.

Per lo studio locale della falda si è fatto riferimento al Sistema Informativo Falda della Provincia di Milano, alle letture di livello effettuate in corrispondenza di alcuni pozzi privati ed ad un rilievo effettuato in sito atto ad individuare eventuali strutture ove nel tempo si sia manifestata la presenza della falda (cave).

Le indagini eseguite hanno inoltre mostrato, nella zona, la presenza di un gradiente idraulico che varia tra lo 0,4-0,5% nella situazione attuale di gestione della falda.

E' necessario ricordare che nella zona in esame l'escursione piezometrica della falda negli ultimi anni rispecchia quella osservata nella zona a Nord di Milano, ove si è assistito al sollevamento della tavola d'acqua anche con un tasso di circa un metro l'anno, a seguito dello sfruttamento più razionale delle risorse idriche, all'aumento dell'inquinamento dell'acquifero ed alla chiusura di numerose industrie. Il depauperamento degli acquiferi, determinato dagli emungimenti di grandi volumi d'acqua aveva invece causato, dalla metà degli anni sessanta sino alla metà degli anni settanta, un abbassamento del livello freatico anche di circa 15 m.

8.1. Risorse Idriche di superficie

Per ricostruire le caratteristiche idrogeologiche del sottosuolo e definire il numero e la tipologia degli acquiferi presenti si è proceduto attraverso un:

- censimento ed ubicazione in carta dei punti di prelievo presenti nei comuni di interesse;
- analisi delle stratigrafie disponibili e determinazione delle profondità di emungimento;
- analisi critica, qualora presente, delle caratteristiche costruttive dei pozzi;
- ricostruzione della superficie piezometrica;
- esecuzione di una serie di sezioni idrogeologiche.

Nel presente paragrafo verranno esaminati i primi 3 punti.

Complessivamente sono stati esaminati circa 30 pozzi appartenenti ai Comuni di Parabiago, San Vittore Olona, Canegrate e Legnano. Tra questi ne sono stati selezionati 15 che, data la qualità e la completezza dell'informazione, e l'ubicazione in prossimità della zona di studio, sono stati utilizzati per la determinazione sia della profondità della falda sia delle quote di prelievo.

Sulla Carta idrogeologica è riportata l'ubicazione di 14 dei 15 pozzi: il pozzo Cadore infatti è fuori carta. I pozzi S. Lorenzo 8 e 10 sono posizionati in prossimità rispettivamente dei pozzi S. Lorenzo 9 e 11: tra questi i primi due si spingono fino a 104 m di profondità dal piano campagna, gli ultimi fino a circa 165 m.

Nelle tabelle che seguono sono state riassunte le principali caratteristiche dei pozzi utilizzati. Occorre precisare che i dati a disposizione sono talvolta lacunosi e fanno riferimento a misure effettuate in passato (1994/1995).

Le tabelle sono divise in base ai Comuni di riferimento in quanto i parametri a disposizione sono diversi. Per i pozzi ubicati nel Comune di Parabiago sono infatti disponibili anche dati relativi al posizionamento del dreno, alla portata specifica, etc., che permettono di definire gli schemi costruttivi dei pozzi, mentre dati del genere non sono disponibili per i pozzi appartenenti ai Comuni di Canegrate e di San Vittore Olona.

Nella tabella 7 relativa ai pozzi di Parabiago sono riportati, oltre alle quote e ai livelli piezometrici, anche i livelli statici e dinamici misurati a pozzo ultimato e le portate specifiche. Sono inoltre indicate le profondità di emungimento, ossia gli intervalli fenestrati lungo i quali è posizionato il dreno. Non si possiedono informazioni sull'anno di costruzione di tutti i pozzi ma solo di alcuni di essi, mentre il livello piezometrico è relativo a misure effettuate il 21 marzo del 1995.

Nome Pozzo	Profondità pozzo	Quota	Liv. piezo- metrico	Profondità falda	Liv. Statico	Liv. Dinamico	Portata	Profondità di emungimento
	(m)	(m s.l.m.m.)	(m s.l.m.m.)	(m da p.c.)	(m da p.c.)	(m da p.c.)	(l/s)	(m da p.c.)
<u>Cadore</u>	<u>110</u>	<u>183</u>	<u>159.79</u>	<u>23.21</u>	<u>19.7</u>	<u>26.9</u>	<u>75</u>	<u>22-110</u>
<u>Don Gnocchi</u>	<u>95</u>	<u>185</u>	<u>160.30</u>	<u>24.7</u>	-	-	-	-
<u>S.Lorenzo 3</u>	<u>104</u>	<u>186</u>	-		<u>26.46</u>	<u>43.79</u>	<u>11.7</u>	<u>57-104</u>
<u>S.Lorenzo 8</u>	<u>104.31</u>	<u>186</u>	<u>161.29</u>	<u>24.71</u>	-	-	-	<u>56-104.31</u>
<u>S.Lorenzo 9</u>	<u>165</u>	<u>186</u>	<u>161.29</u>	<u>24.71</u>	-	-	-	<u>101-165</u>
<u>S.Lorenzo 10</u>	<u>104</u>	<u>188</u>	<u>161.33</u>	<u>26.67</u>	-	-	-	<u>57-104</u>
<u>S.Lorenzo 11</u>	<u>165.20</u>	<u>188</u>	<u>161.33</u>	<u>26.67</u>	-	-	-	<u>100-165.20</u>

Tabella 7 - Elenco pozzi del Comune di Parabiago utilizzati e relativi parametri; le misure del livello piezometrico sono state effettuate il 21 marzo del 1995.

Misure più recenti del livello statico e del livello dinamico effettuate in pozzi presenti nel territorio comunale di Parabiago sono state fornite dall'A.M.G.A S.p.A. (Alto Milanese Gestioni Avanzate) di Legnano e sono riassunte nella tabella 8 di seguito riportata.

Nome Pozzo	Data misura	Livello Statico	Livello Dinamico
		(m da p.c.)	(m da p.c.)
San Lorenzo 1	15/09/2004	22.70	51.30
San Lorenzo 2	15/09/2004	22.40	28.30
San Lorenzo 3	15/09/2004	24.80	41.90
San Lorenzo 4	15/09/2004	24.50	40.80
Piazza Vittoria	15/09/2004	22.80	27.90
Don Gnocchi	15/09/2004	22.70	26.30

Tabella 8 - Misure dei livelli di falda effettuate dall'A.M.G.A. in alcuni pozzi del Comune di Parabiago

Dal confronto tra le colonne evidenziate in giallo delle tabelle 7 e 8 emerge come i valori misurati nel 1995 e nel 2004 siano pressoché simili, mostrando una falda posizionata tra circa 22 e 26 m da p.c..

Per quanto riguarda invece i pozzi dei Comuni di Canegrate, San Vittore Olona e Cerro Maggiore, non si dispongono misure di portata e non si conosce il posizionamento del dreno. Pertanto nella tabella 9 anziché le “profondità di emungimento” vengono indicate le profondità in cui sono presenti i filtri, ossia i tratti fenestrati del pozzo di riferimento. I livelli piezometrici riportati si riferiscono a misure effettuate nel novembre del 1994.

Nome pozzo	Comune	Profondità pozzo	Quota	Liv. piezometrico	Profondità falda	Tratti filtrati
		(m)	(m s.l.m.m.)	(m s.l.m.m.)	(m da p.c.)	(m da p.c.)
<u>Battisti 2</u>	<u>S. Vittore Olona</u>	<u>100.7</u>	<u>193</u>	<u>165.93</u>	<u>27.07</u>	<u>60-80</u>
<u>Battisti Torre</u>	<u>S. Vittore Olona</u>	<u>100</u>	<u>196</u>	<u>166.37</u>	<u>29.63</u>	<u>40-45; 51-57; 64-80; 84-88</u>
<u>Europa</u>	<u>S. Vittore Olona</u>	<u>100</u>	<u>196</u>	<u>166.70</u>	<u>29.30-</u>	<u>40-45; 50-53; 56-67; 69-85</u>
<u>Bosco</u>	<u>S. Vittore Olona</u>	<u>150</u>	<u>197</u>	<u>167.83</u>	<u>29.17</u>	<u>99-102; 110- 124; 130-147</u>
<u>Cappuccini</u>	<u>Cerro Maggiore</u>	<u>142</u>	<u>205</u>	<u>168.89</u>	<u>36.11</u>	<u>105-108; 124- 127; 129-140</u>
<u>Cons. Dep. Nord Milano</u>	<u>Canegrate</u>	<u>40</u>	<u>184</u>	<u>161.43</u>	<u>22.57</u>	<u>28-40</u>
<u>Palazzini Manif</u>	<u>Canegrate</u>	<u>75</u>	<u>196</u>	<u>163.60</u>	<u>32.4</u>	<u>35-38; 41-44; 46-49; 54-58; 65-72</u>

Tabella 9 - Elenco pozzi dei Comuni di Canegrate, San Vittore Olona e Cerro Maggiore utilizzati e relativi parametri; le misure del livello piezometrico sono state effettuate nel novembre del 1994.

Al momento non si possiedono misure più recenti per i Comuni di Canegrate e di San Vittore Olona. Per il vicino Comune di Cerro Maggiore sono stati reperiti i risultati di alcune misure effettuate dall'A.M.G.A. il 15 settembre del 2004 presso alcuni pozzi comunali, tra cui anche il pozzo Cappuccini sopra riportato. In tale pozzo le misure effettuate dall'A.M.G.A. rilevano una falda posizionata a 33.60 m dal piano campagna;

dal confronto con la misura effettuata nel 1994 nel medesimo pozzo (evidenziata in giallino in tabella 7) si nota una differenza di circa 2,50 m.

Dall'esame delle stratigrafie dei pozzi e, soprattutto, dall'analisi attenta del posizionamento dei filtri e del dreno, è emerso inoltre che generalmente i pozzi captano acqua a profondità superiori ai 40 m dal piano campagna.

Di seguito sono riportati gli schemi costruttivi di alcuni pozzi di Parabiago. Nella loro ricostruzione si è cercato di mettere in risalto le profondità di emungimento (vedasi figure 19-24).

Dallo schema del pozzo Cadore si evince che esso capta a partire da 20 m dal p.c. Tuttavia alcuni dati reperiti presso l'A.M.G.A. di Legnano indicano come tale pozzo sia stato successivamente approfondito e attualmente peschi a profondità maggiori.

L'ubicazione del pozzo Cadore non è visibile nella Carta Idrogeologica in quanto fuoriesce dall'area di studio. Allegato allo schema costruttivo del pozzo è pertanto riportata una kmap che ne indica l'esatta posizione (vedasi figura 18).

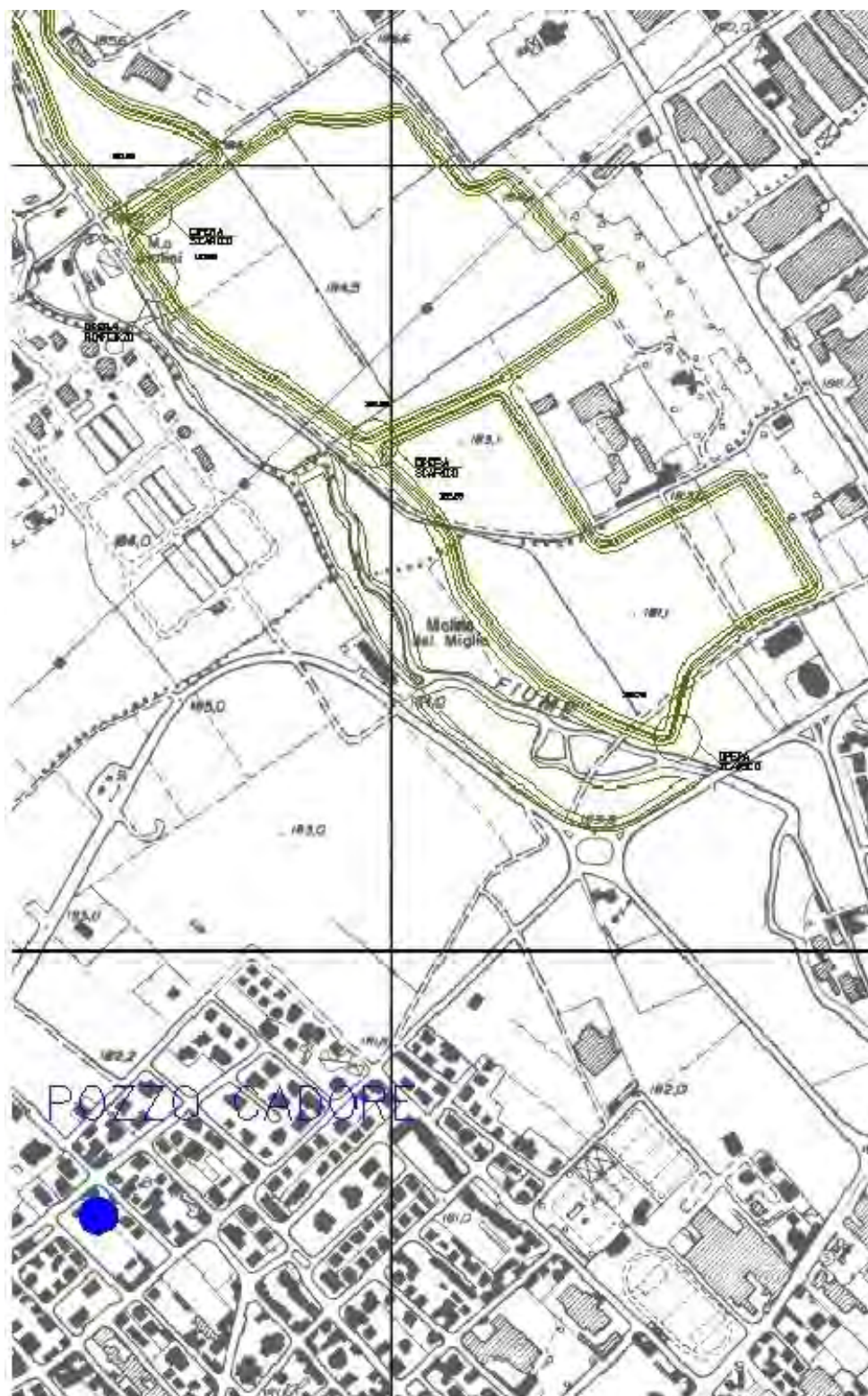


Figura 18 - Ubicazione Pozzo Cadore

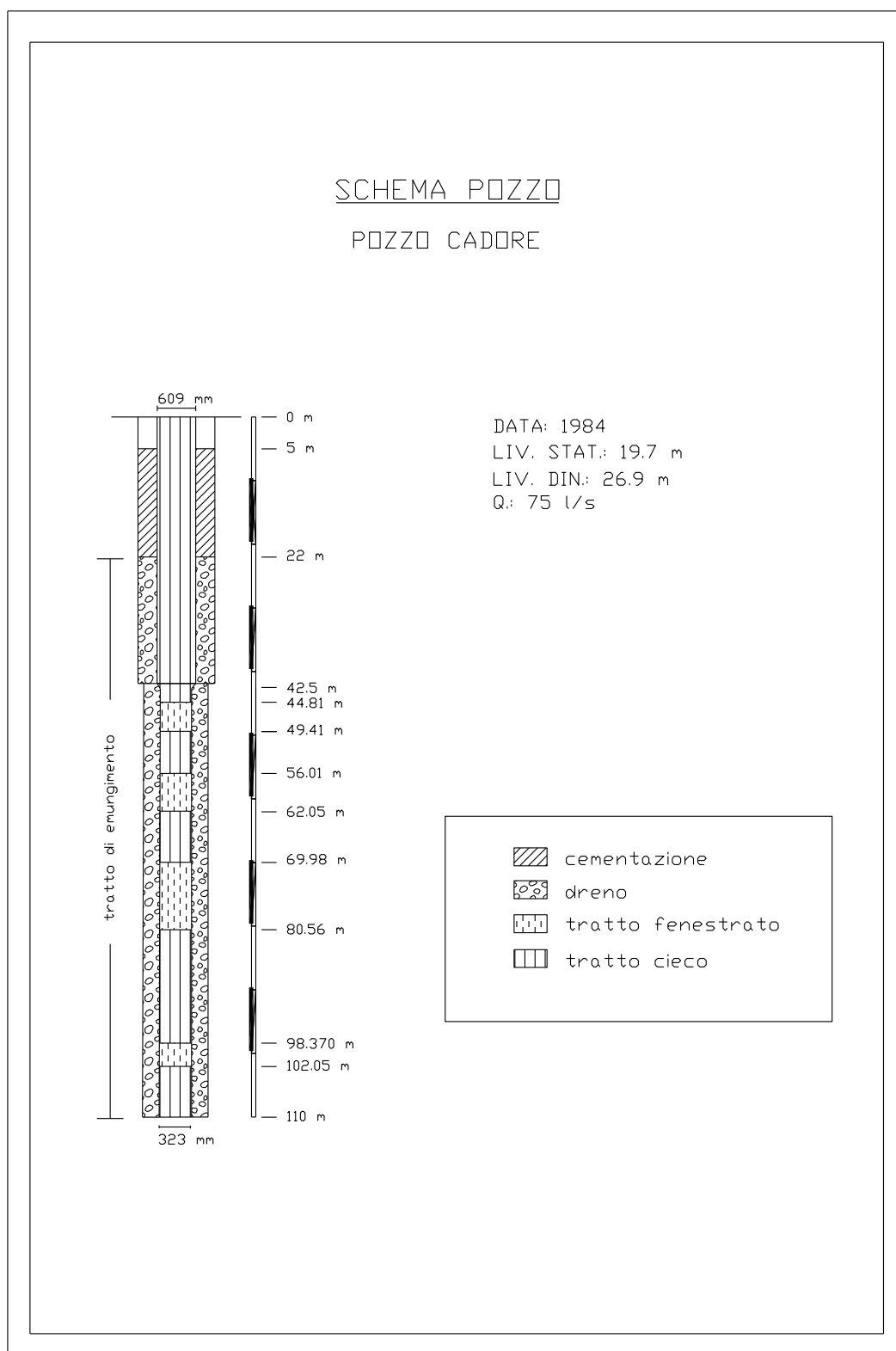


Figura 19 - Schema stratigrafico “Pozzo Cadore”

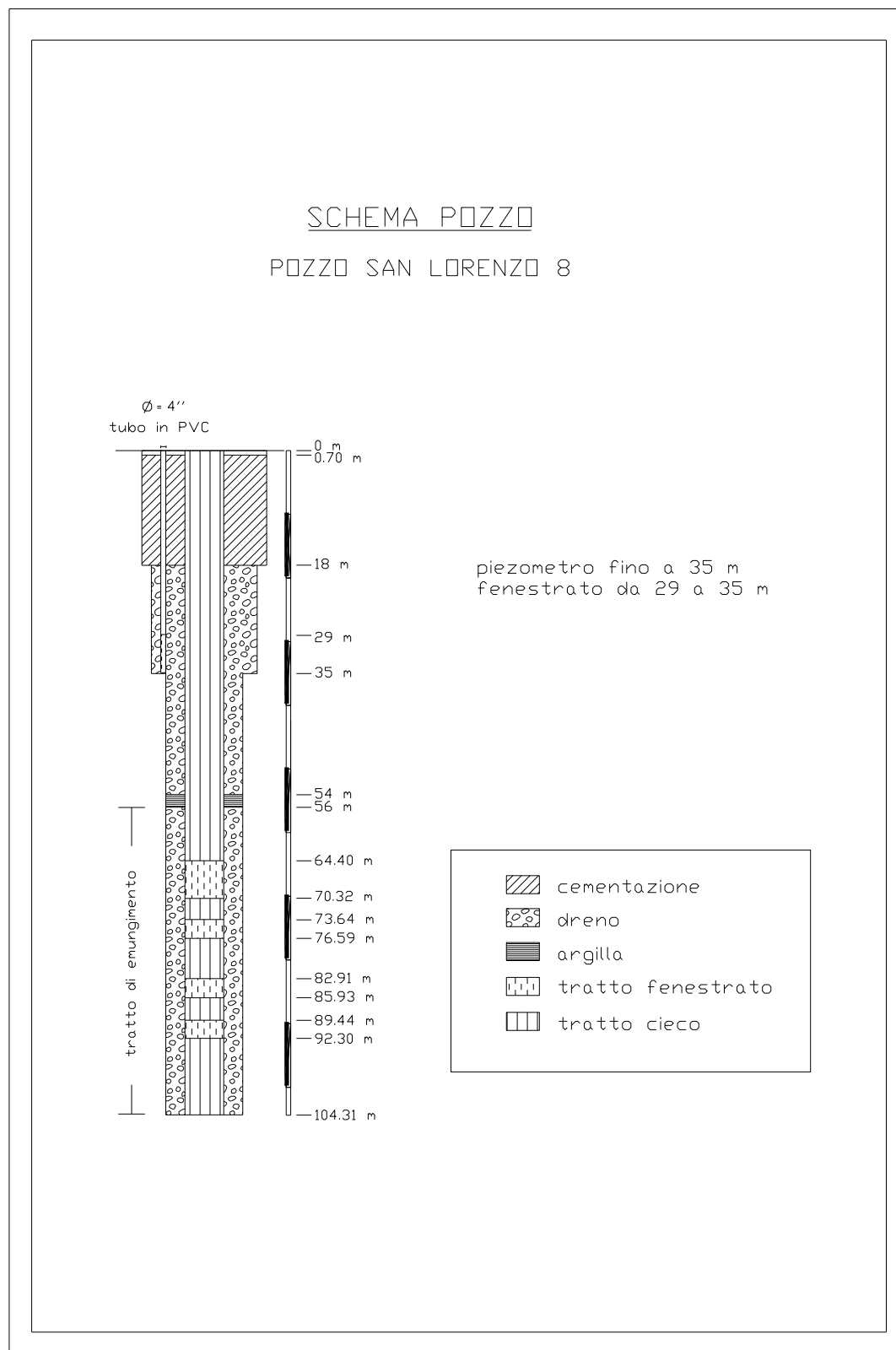


Figura 20 - Schema stratigrafico “Pozzo San Lorenzo 8”

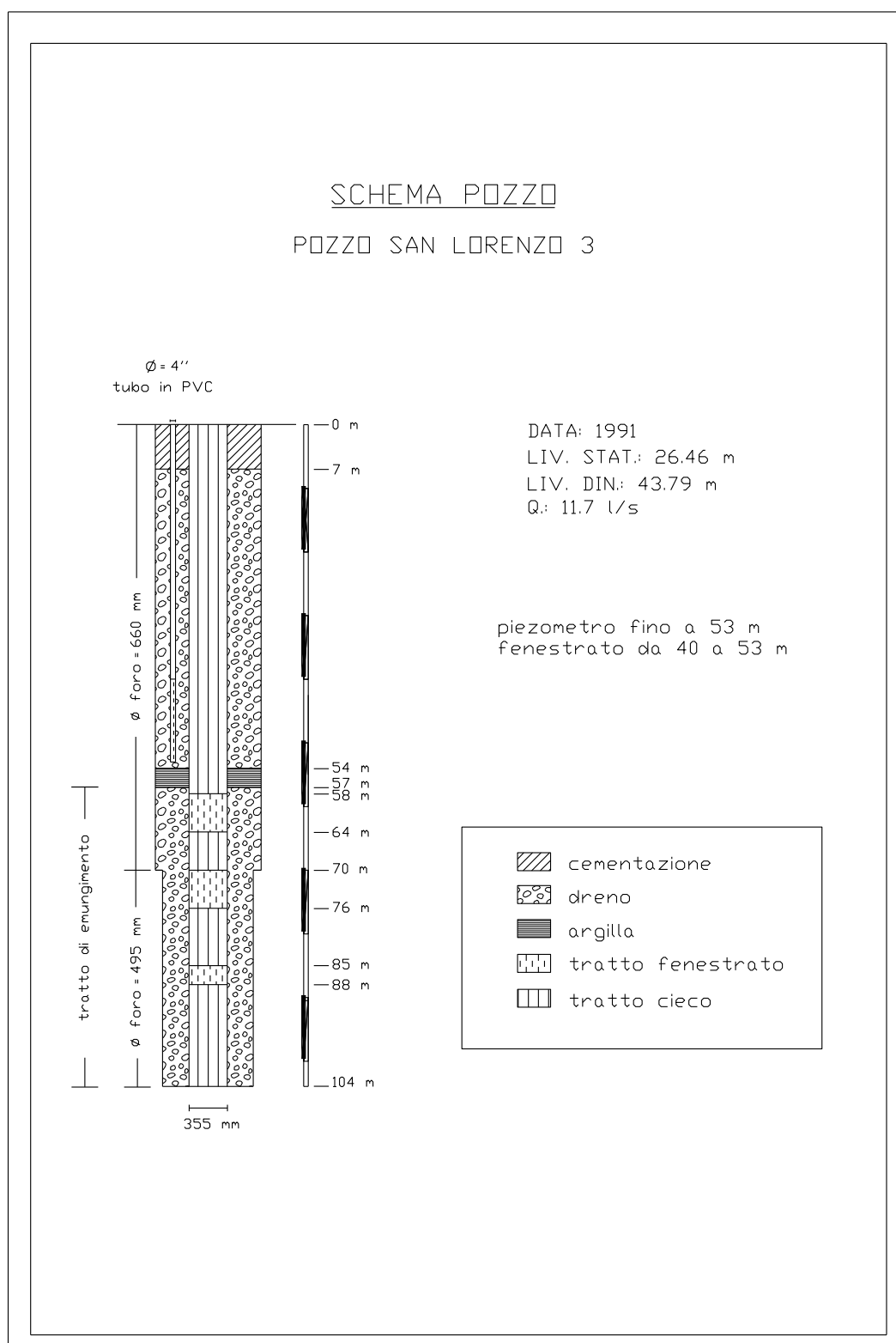


Figura 21 - Schema stratigrafico “Pozzo San Lorenzo 3”

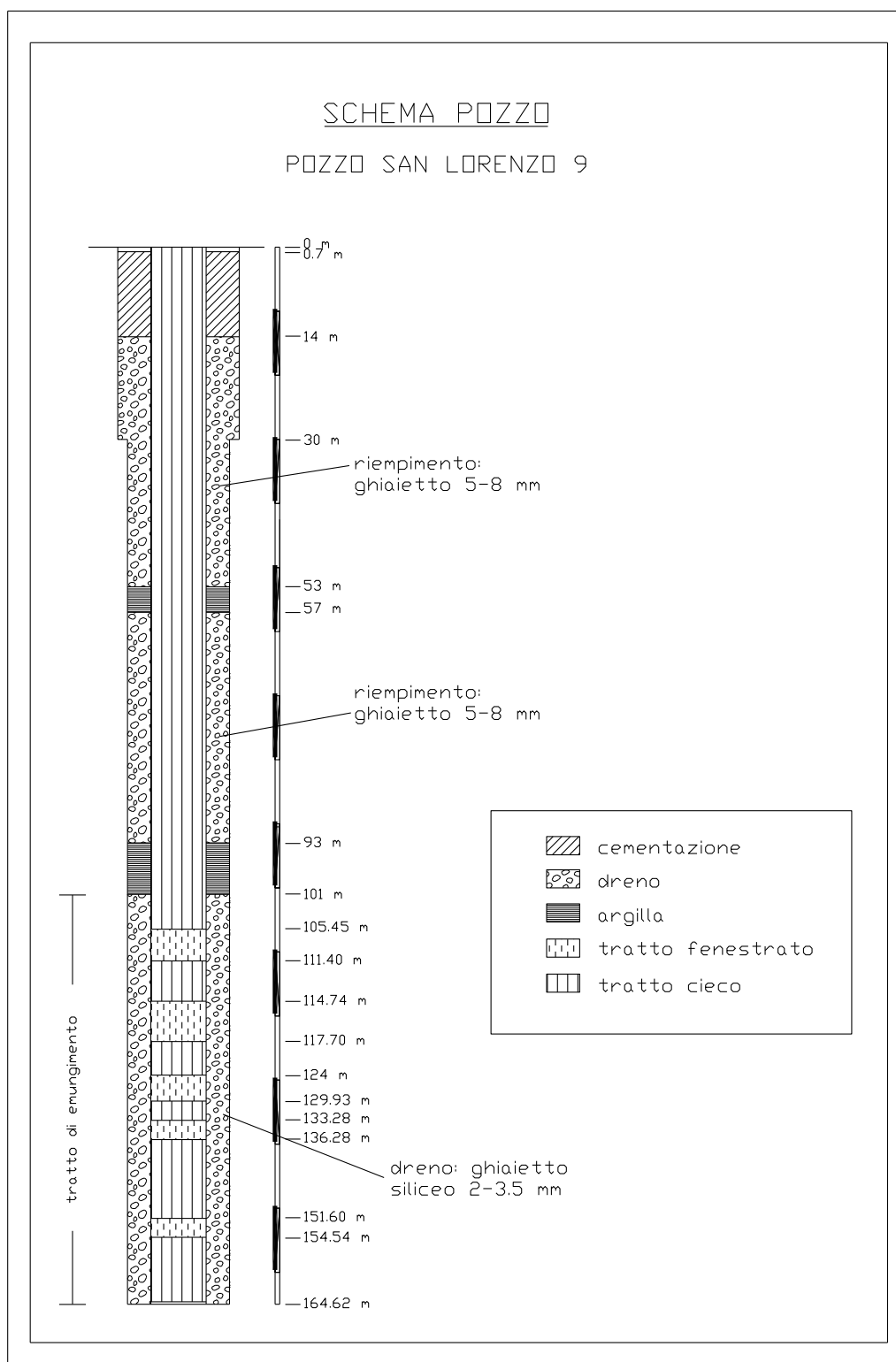


Figura 22 - Schema stratigrafico "Pozzo San Lorenzo 9"

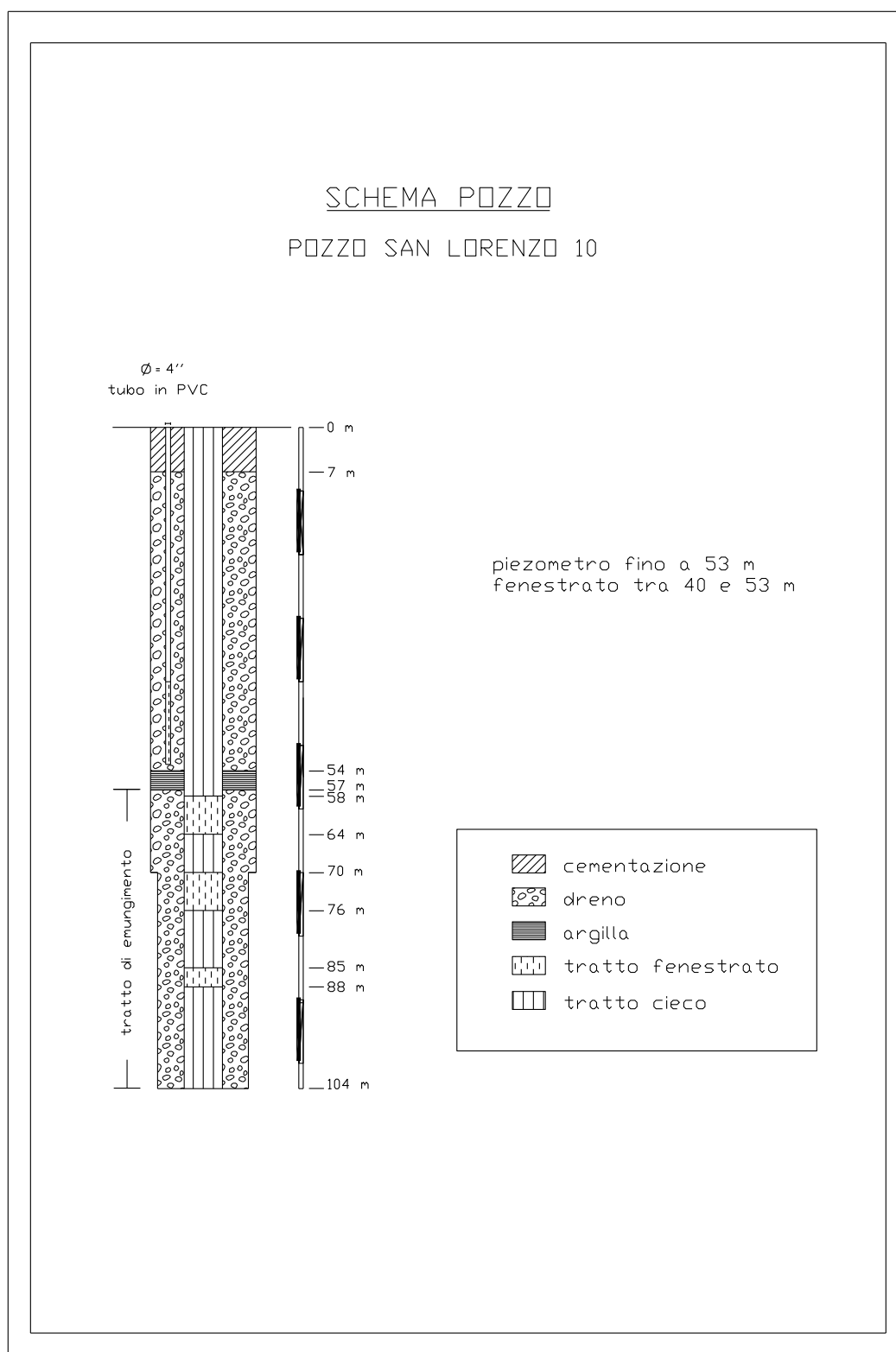


Figura 23 - Schema stratigrafico “Pozzo San Lorenzo 10”

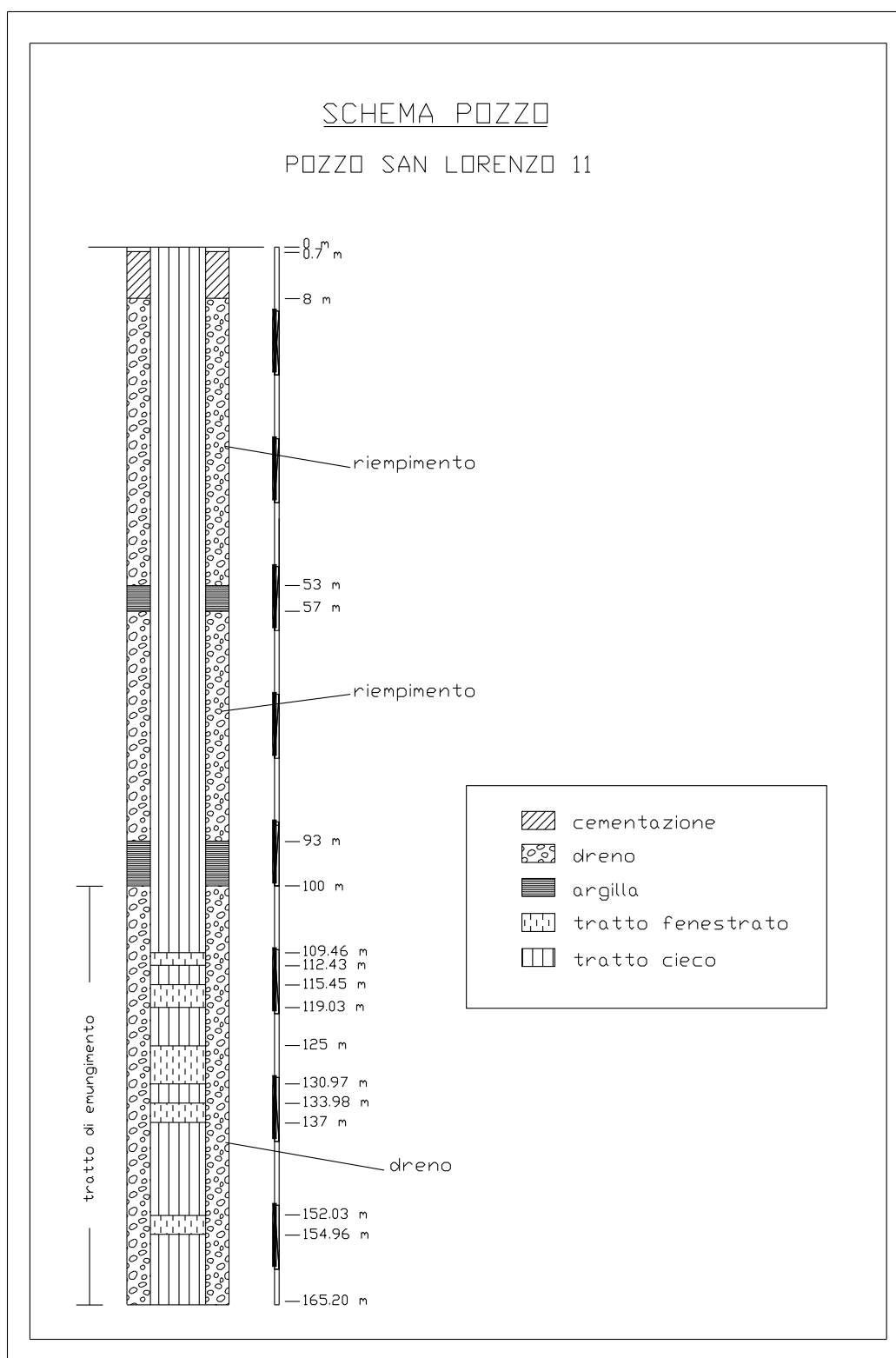


Figura 24 - Schema stratigrafico “Pozzo San Lorenzo 11”

8.2. Aspetti Idrogeologici locali

Lo schema idrogeologico locale può essere rappresentato attraverso un sistema multistrato nel quale si colloca, superiormente, una falda freatica situata tra 20-30 m dal p.c. In profondità sono riscontrabili una serie di falde profonde in pressione la cui presenza, come si evince dai riscontri bibliografici, è legata a strutture drenanti separate verticalmente ed orizzontalmente da letti semipermeabili.

Dagli studi effettuati nei Comuni della zona emerge che l'orizzonte non saturo decresce da Nord a Sud e si estende dal piano campagna sino ad una profondità di 20 -30 m (Sistema informativo falda dell'U.O.T. Progetti Speciali del Settore Ecologia, Ass. Ambiente della Provincia di Milano, relative agli anni 1999- 2001). Valori diversi di soggiacenza della falda sono stati misurati in dipendenza dai periodi irrigui.

E' utile ricordare che, in prossimità delle aree di progetto, il fiume Olona risulta sospeso rispetto alla superficie piezometrica di circa 15-20 m.

Le carte delle isopiezometriche elaborate dalla Provincia di Milano (vedasi figura 25), riferite agli anni 2004 presentano valori piezometrici compresi tra 160 e 165 m s.l.m.m..

Dal confronto tra le misure dei livelli piezometrici effettuate nei Comuni di Parabiago, di Canegrate, di Cerro Maggiore e di San Vittore Olona negli anni 1994/1995 con quelle più recenti effettuate nel 2004 emerge che negli ultimi 9/10 anni si è verificato nella zona di interesse un generale innalzamento della falda. Tale innalzamento, in base ai dati disponibili al momento e alla loro distribuzione, non è quantificabile con certezza, anche se sembra oscillare tra i 2 e i 2.50 m.

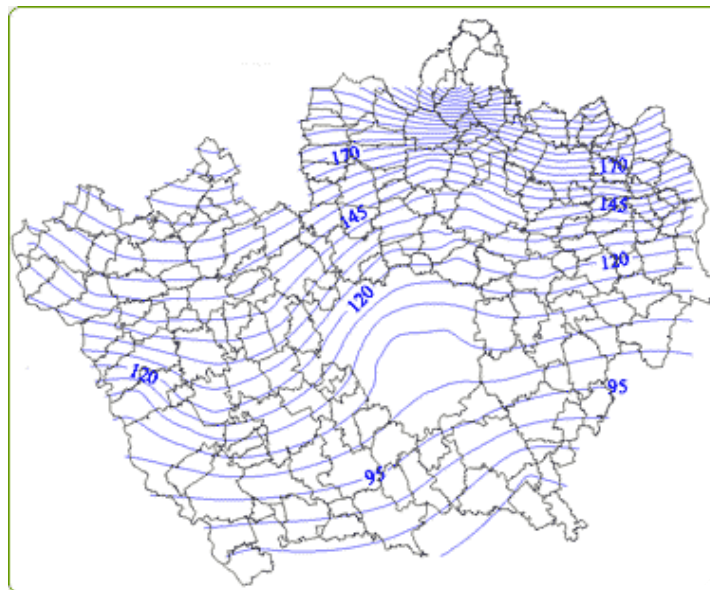


Figura 25 - Carta delle isopiezometriche redatta Provincia di Milano

Nei grafici di seguito riportati (vedasi figure 26-27) è possibile osservare l'andamento della falda in relazione alla topografia.

Nel Comune di Parabiago la falda è posizionata mediamente intorno ai 22-25 m dal piano campagna, mentre nei Comuni di San Vittore Olona e di Canegrate la falda è più profonda e si trova tra 25 e 30 m dal piano campagna. Occorre sottolineare di nuovo che la ricostruzione sotto riportata è stata eseguita sulla base di misure del livello piezometrico effettuate negli anni 1994 e 1995, vale a dire circa 10 anni fa. Da allora si è registrato nel territorio provinciale milanese e nella zona in esame un generale innalzamento della falda che trova conferma nelle recenti misure effettuate dall'A.M.G.A.

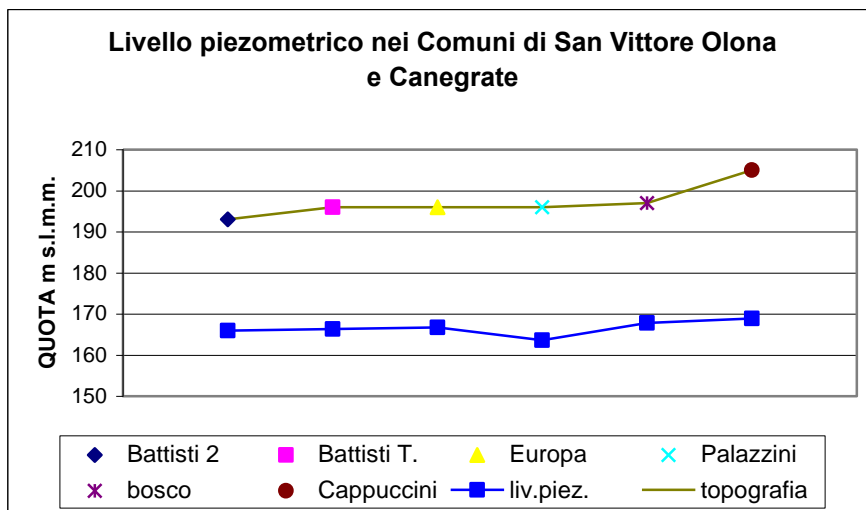


Figura 26 - Livelli piezometri misurati nel Comune di Parabiago

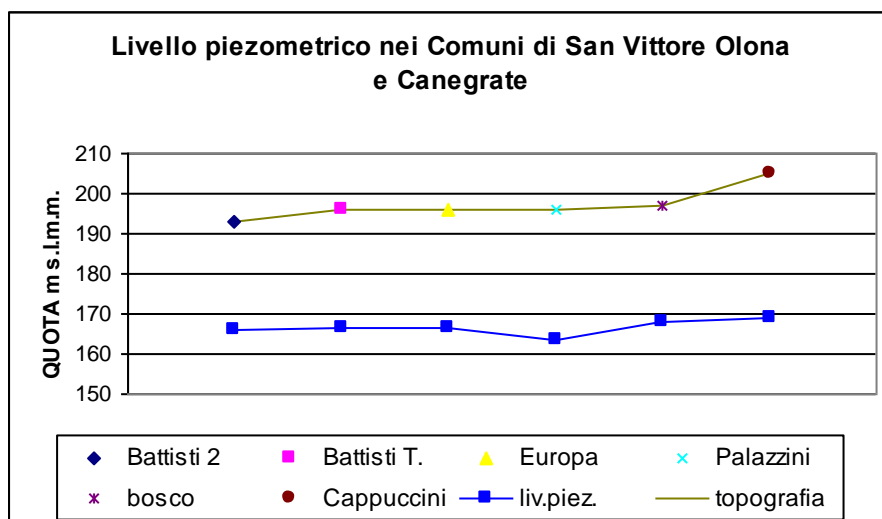


Figura 27 - Misure piezometriche misurate nei Comuni di Canegrate e San Vittore Olona

8.3. Permeabilità

La stima del coefficiente di permeabilità è stata effettuata utilizzando le equazioni per i pozzi basate sull'ipotesi di Dupuit (linee equipotenziali rettilinee e verticali).

Per i pozzi in falda freatica e in condizioni stazionarie l'equazione che correla gli abbassamenti alle portate è:

$$Q = \frac{\pi K (H^2 - h^2)}{\ln(R/r)}$$

dove:

$Q(m^3/s)$ = portata del pozzo

$K(m/s)$ = coefficiente di permeabilità

$H(m)$ = altezza della falda indisturbata

$h(m)$ = altezza dell'acqua nel pozzo

R = raggio di influenza del pozzo

r = raggio del pozzo

Disponendo dei dati relativi al pozzo "Cadore":

livello statico = 19.70m

livello dinamico = 26.90m

$$Q = 0.075 m^3/s$$

e ipotizzando:

che la base impermeabile si trovi a 110m di profondità

$$R = 200 \phi_{\text{pozzo}}$$

si ottiene:

$$K_{\text{equivalente}} = 1.15 \cdot 10^{-4} m/s$$

Il calcolo è stato effettuato su terreni stratificati aventi diversa litologia posti in parallelo. Dal momento che alle profondità interessate dal tratto di emungimento (da 22 a 110m di profondità) non si riscontrano materiali coesivi, si può ritenere che il valore trovato ben rappresenti anche le permeabilità dei singoli strati.

Lo stesso calcolo è stato effettuato con i dati relativi al pozzo San Lorenzo 3:

livello statico = 26.46m

livello dinamico = 43.79m

$$Q = 0.0117 m^3/s$$

e ipotizzando:

che la base impermeabile si trovi a 104m di profondità

$$R = 200 \phi_{\text{pozzo}}$$

si ottiene:

$$K_{\text{equivalente}} = 9.36 \cdot 10^{-6} m/s$$

I calcoli sopra riportati definiscono, in presenza di una successione stratigrafica discontinua, un valore di conducibilità idraulica medio che è rappresentativo delle condizioni

stratigrafiche della zona. Infatti, le diagrafie dei pozzi hanno mostrato nel tratto di emungimento (da 57 a 104 m di profondità) la presenza di materiale di buona pezzatura (permeabile) talvolta alternato con livelli coesivi a basso grado di permeabilità. La presenza di queste intercalazioni non consente, quindi, di assegnare ad un singolo livello litologico il valore di permeabilità elaborato per l'unità acquifera interessata.

Le prove di permeabilità mediante edometro a carico variabile effettuate in corrispondenza dei campioni prelevati durante le indagini geognostiche mostrano valori di permeabilità nell'ordine di $K = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$. Tali valori sono ottenuti su campioni ricostituiti di materiale selezionato a sono state eseguite a diversi livelli tensionali mostrando, come logico, una diminuzione con la profondità.

Per gli strati più superficiali, sulla base di queste informazioni e tenendo in considerazione che le stratigrafie dei pozzi hanno evidenziato un discreto aumento della componente più fine in superficie, si è provveduto alla stima dei valori di permeabilità.

La tabella seguente riporta i valori di conducibilità idraulica per i livelli rilevati in stratigrafia.

Liv. Fondamentale della Pianura				Casse in sinistra idrogr.				Casse in destra idrogr.			
Da	a	litologia	K	da	a	litologia		da	a	litologia	
m	m		m/s ²	m	m		m/s ²	m	m		m/s ²
0	1	Argilla limosa a scheletro ghiaioso sabbioso.	10^{-7}	0	2	Limo sabbioso o limo argilloso	10^{-7}	0.00	1.00	Ghiaie sabbiose francamente limose o limoso argillose.	10^{-7}
1	6	Ghiaia con sabbia a matrice limoso argillosa	$5 \cdot 10^{-6}$	1	15	Ghiaia sabbiosa con ciottoli e limo	$5 \cdot 10^{-6}$	1.00	15.00	Ghiaia con sabbia limosa	$5 \cdot 10^{-6}$
6	18	Ghiaia e sabbia a matrice limoso argillosa	$5 \cdot 10^{-5}$	15	20	Ghiaia sabbiosa con ciottoli e limo	$5 \cdot 10^{-5}$	15.00	20.00	Ghiaia e sabbia debolmente limosa	$5 \cdot 10^{-5}$
18	230	Ghiaia e sabbia a matrice limoso sabbiosa	10^{-5}	20	500	Ghiaia e sabbia debolmente limosa con ciottoli	10^{-4}	20.00	50.00	Ghiaia e sabbia debolmente limosa	10^{-4}
23	500	Ghiaia e sabbia	10^{-4}								

Tabella 10 - Coefficienti di permeabilità dei singoli terreni.

9. SISMICITA'

Gli annali storici relativi agli eventi sismici registrati storicamente nel milanese indicano l'assenza di una particolare attività sismica. Gli eventi registrati sono sporadici, spesso di modesta intensità per effetto della rilevante distanza dagli epicentri e/o per la rilevante profondità degli ipocentri.

Infatti, nella maggior parte dei casi si tratta di sismi indiretti, in altre parole di eventi originati in regioni distanti, ma avvertiti comunque in zona anche se con intensità molto minore rispetto alle aree epicentrali. Normalmente si tratta comunque di eventi sotto la soglia del danno.

In estrema sintesi risulta che i livelli di sismicità risentibili nel milanese sono principalmente dovuti ad attività provenienti da zone più o meno limitrofe.

La figura 8 e la tabella 11 riassumono brevemente la storia sismica della città di Milano; è evidente uno sciame sismico che ha inizio fra il 1700 e 1800 ed è attribuibile più ad una maggior disponibilità di dati strumentali che ad un reale incremento della sismicità nel periodo.

Nel complesso si evince, per l'area in studio, una modesta pericolosità sismica recepita anche da diverse normative in materia. Secondo l'Ordinanza del Presidente del Consiglio n° 3274 del 20 marzo 2003, che classifica tutto il territorio nazionale in zone a diverso grado di pericolosità, il Comune di Milano e con esso anche i comuni di Canegrate, Legnano, Parabiago e S. Vittore Olona sono compresi in zona 4, ovvero la classe meno gravosa. Secondo le precedenti normative le stesse aree erano considerate non sismiche.



Figura 28. Storia sismica della città di Milano (eventi con $M > 5$)

Data					Effetti	in occasione del terremoto di:	
Ye	Mo	Da	Ho	Mi	Is (MCS)	Area epicentrale	Ix Ms
1117	01	03	13		70	VERONESE	90 64
1222	12	25	11		60	BRESCIANO	80 59
1951	05	15	22	54	60	LODIGIANO	60 49
1806	02	12			55	NOVELLARA	70 50
1695	02	25	05	30	50	ASOLO	90 64
1802	05	12	09	30	50	SONCINO	80 55
1810	12	25	00	45	50	NOVELLARA	70 50
1873	06	29	03	55	50	BELLUNESE	100 64
1901	10	30	14	49	50	SALO'	80 55
1914	10	27	09	22	50	GARFAGNANA	70 58
1276	07	28			45	CREMONESE	60 47
1348	01	25			45	CARNIA	95 64
1740	03	06	05	15	45	GARFAGNANA	75 50

Tabella 11. Eventi sismici registrati a Milano (fonte: sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. www.ingv.it).

Secondo le più recenti Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) di cui al Decreto del 17/01/2018, pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale n° 42 del 20/01/2018, le azioni sismiche debbono essere determinate in relazione al periodo di riferimento V_R , che si ricava moltiplicando la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U , a sua volta funzione della classe d'uso come da tabella 2.4.II delle N.T.

Nel caso in argomento si è considerata una **vita nominale "VN"**, ai sensi del par. 2.4.1 delle sopraccitate NTC, pari a 50 anni. La classe d'uso, ai sensi del par. 2.4.2, è la II. Si ha quindi:

$$V_R = V_N * C_U = 50 * 1,0 = 50 \text{ anni}$$

9.1. Pericolosità sismica di base ed azioni sismiche

Come si evince dal cap. 3.2. delle NTC le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite, si definiscono a partire dalla “pericolosità sismica di base del sito”, definita in termini di accelerazione massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $SC(T)$ con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PV_r come definite nel periodo di riferimento VR .

Ai fini della normativa le forme spettrali sono definite per ciascuna probabilità di superamento nel periodo di riferimento PV_r a partire dai seguenti parametri, su sito di riferimento rigido orizzontale:

a_g accelerazione orizzontale massima

F_o valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale

T^*C periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

I valori dei parametri di cui sopra sono allegati in calce alle NTC per diversi periodi di ritorno (TR), e distinti in base ad un codice di identificazione (ID) nonché delle relative coordinate geografiche (latitudine e longitudine) del sito in studio. Possono pertanto essere determinati o sulla base del Comune in cui ricadono i lavori, o in base alle esatte coordinate geografiche in cui ricadono le singole opere.

La categoria di suolo di fondazione, di cui al capitolo 3.2.2 delle N.T.C., avviene attraverso la determinazione del parametro V_{s30} e dei contenuti della tab. 3.2.II, di seguito riportata.

A	Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi caratterizzati da valori di VS30 superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 m.
B	Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di VS30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica NSPT > 50 o coesione non drenata $c_u > 250$ kPa).
C	Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di VS30 compresi tra 180 m/s e 360 m/s ($15 < \text{NSPT} < 50$, $70 \text{ kPa} < c_u < 250 \text{ kPa}$)
D	Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti, caratterizzati da valori di VS30 minori di 180 m/s ($\text{NSPT} < 15$, $c_u < 70 \text{ kPa}$).
E	Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali, con valori di VS30 simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con VS30 superiore ad 800 m/s.

Tabella 12. Categoria di suolo di fondazione

Dato che l'indagine geognostica è stata eseguita nel 2005, mentre la norma è del 2018, nel caso in studio non è stata effettuata una determinazione diretta della Vs30. In ogni caso vista la modesta estensione dell'intervento si ritiene di poter procedere ad una valutazione mediante la conoscenza dell'assetto stratigrafico del territorio, i valori di Vs normalmente attribuiti a questi terreni, nonché esperienze pregresse nei medesimi materiali.

In conformità a questi dati la categoria di suolo di fondazione attribuita ai terreni è la C.

Per quanto attiene le condizioni topografiche, con riferimento alle tabelle 3.2.IV e 3.2.VI delle N.T.C., data la natura del territorio sostanzialmente pianeggiante, si considera una categoria T1 cui compete un fattore di amplificazione topografica ST pari ad 1,00.

Per la valutazione dell'azione sismica in prima fase sono stati individuati i parametri spettrali a_g , F_o , T^*_c , propri del Comune di S. Vittore Olona tramite una media pesata effettuata con i valori riguardanti i più vicini nodi della griglia di accelerazioni. Per fare ciò si è utilizzato il programma “Spettri di risposta” del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (ver. 1.0.3), così come rappresentato in figura 29.

I valori sono ottenuti per un periodo di ritorno T_r , per lo Stato di Salvaguardia della Vita (SLV) pari a 475 anni.



Figura 29. Identificazione del sito all'interno della maglia di appartenenza nel reticolo di riferimento (programma: spettri di risposta del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, ver. 1.0.3)

Sempre mediante il suddetto programma si ottiene un valore di riferimento:

$$a_g = 0,039$$

L'accelerazione massima attesa in superficie deriva dalla:

$$a_{\max} = S \times a_g = S_s \times S_T \times a_g$$

S = coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica S_s e quella topografica S_T

a_g = accelerazione orizzontale massima sul sito di riferimento rigido.

Sulla base delle formule riportate in tabella 3.2.IV delle NTC il coefficiente di amplificazione stratigrafica S_s (per suolo di categoria C) nel caso in studio vale 1,5, mentre quello topografico S_t vale 1,00. Pertanto si ha che

$$a_{\max} = 0,0585$$

I coefficienti sismici orizzontali e verticali da porre a base delle verifiche vengono individuati dalla:

$$k_h = \beta_s \frac{a_{\max}}{g}$$

$$k_v = \pm 0,5 k_h$$

dove B_s è un coefficiente di riduzione dell'accelerazione orizzontale massima attesa al sito che, ai sensi della tabella 7.11.I delle NTC, vale 0,20.

Pertanto si ha:

$$K_h = 0,012$$

$$K_v = 0,006$$

10. IDROGRAFIA

L'area di competenza del progetto ha una disponibilità idrica rilevante tanto in superficie quanto nel sottosuolo. Le notevoli portate provenienti dalle zone montane e pedemontane, associate alle cospicue precipitazioni ricadenti direttamente nell'area, contribuiscono ad alimentare la fitta rete idrografica.

Anticamente queste zone, prima di un'attenta regolazione dei flussi idrici da parte antropica, erano soggette a repentini e considerevoli impaludamenti. Per ovviare al problema è stato realizzato, e affinato nel tempo, un sistema di canalizzazione articolato attraverso canali di maggiore portata coadiuvati da una fittissima rete di canali minori e fossi particolarmente utili per l'irrigazione dei territori agricoli. La realizzazione di quest'articolata rete di flusso idrico si è appoggiata anche a resti di rami fluviali abbandonati.

Il collettore idrico principale presente è il fiume Olona, che ha origine nelle Prealpi varesine da dove procede con direzione NO-SE. All'altezza di Rho il corso d'acqua principale viene deviato mediante un'opera di presa nel Ramo Olona del Canale scolmatore delle piene di Nord-Ovest.

L'alveo naturale, invece, procede ulteriormente verso Milano prima di immettersi nel sistema tombinato dei Navigli interni e, successivamente, nel Lambro meridionale.

Il Ramo Olona prosegue verso Sud congiungendosi con il Ramo Seveso con cui scambia parte delle competenze. Il corso del Ramo Olona prosegue, comunque, con un proprio corso con il tratto artificiale denominato deviatore Olona. Alla sezione di chiusura di Milano il bacino idrografico del fiume Olona è di 475 km².

Il regime idrico del fiume è in sostanza di tipo pedemontano ed è fortemente influenzato dalle variazioni climatiche stagionali.

Le portate, misurate lungo il corso del fiume, dimostrano che i valori massimi registrati sono concomitanti a quelli misurati in corrispondenza dello scioglimento delle nevi sull'arco alpino. Le portate del fiume Olona sono regimate dagli apporti fognari del milanese, dalla colatura delle aree irrigue del Consorzio Villoresi e in parte, del Consorzio della Muzza. Gli usi sono prevalentemente per l'agricoltura e come fonte di energia da parte delle varie industrie che si trovano numerose sulle sponde e che, insieme alla potente urbanizzazione, ne hanno degradato in maniera decisiva la qualità delle acque. Inoltre tutti gli interventi di derivazione, restituzione incontrollata e mancato rispetto delle aree golenali hanno modificato il profilo naturale, variando il regime idraulico del

11. SEZIONI IDROGEOLOGICHE

11.1. Commento alle Sezioni Idrogeologiche

Nelle aree in cui è prevista la realizzazione delle casse di espansione, ed al fine di ricostruire le caratteristiche idrogeologiche del sottosuolo ed individuare il numero e la tipologia degli acquiferi presenti, sono state eseguite 4 sezioni idrogeologiche: una orientata longitudinalmente al corso del fiume Olona (A-A') e tre trasversali ad esso (B-B', C-C', D-D').

Per l'esecuzione di tali sezioni sono state esaminate le stratigrafie disponibili e relative principalmente a studi geologici effettuati nei Comuni di San Vittore Olona e di Parabiago. Sulle sezioni eseguite sono indicati sia i tratti fenestrati dei pozzi sia, ove presente, il posizionamento del dreno. Sulla carta delle sezioni stratigrafiche sono state inoltre riportate, sotto la voce "zona di incerta determinazione", quelle aree ove per insufficienza di dati ed informazioni non è stato possibile operare una ricostruzione completa del sottosuolo.

Tutte le sezioni mostrano, alla profondità di circa 100 m dal piano campagna, un netto aumento della frazione argillosa che segna l'inizio di un acquifero inferiore con caratteristiche differenti da quello soprastante. La presenza di questo acquifero inferiore è ben visibile nelle sezioni A-A' e B-B', ove sono presenti alcuni pozzi che raggiungono le profondità di 150-165 m dal piano campagna (Bosco, S. Lorenzo 9 e S. Lorenzo 11).

L'acquifero soprastante è costituito prevalentemente da ghiaie e sabbie. Localmente sembra essere suddiviso in due acquiferi dalla presenza di un livello di argilla dello spessore di circa 5-7 m posto a profondità comprese tra i 45 e i 55 m da p.c.. Questo livello, pur mantenendo un discreto sviluppo laterale, non appare continuo e non permette quindi di individuare con certezza la presenza di due acquiferi distinti. Tale situazione è osservabile nella sezione A-A', dove i pozzi Europa, Battisti Torre, S. Lorenzo 9 e S. Lorenzo 11 individuano il livello di argilla sopra citato, mentre il pozzo Battisti 2 non lo individua e nel pozzo Bosco il livello di argilla presenta spessore molto ridotto. Nelle sezioni A-A' e B-B' si è deciso di utilizzare per la ricostruzione degli acquiferi le stratigrafie dei pozzi S. Lorenzo 9 e 11 invece di quelle dei vicini pozzi S. Lorenzo 8 e 10, in quanto i primi due sono più profondi (165 m circa) e permettono quindi di ricostruire parzialmente anche l'acquifero inferiore.

Vengono di seguito descritte le singole sezioni.

SEZIONE A-A'

La sezione si sviluppa da NNW a SSE, con quote del piano campagna che variano da circa 199 a circa 195 m l.m.m.. Nell'area in cui è ubicata la sezione affiorano i depositi del Livello Fondamentale della Pianura.

La sezione mostra la prevalenza di depositi ghiaioso-sabbiosi fino alla profondità di circa 100 m da p.c.; a circa 45-50 m dal p.c. i pozzi Europa, Battisti Torre e S. Lorenzo 9 e 11 individuano un livello di argilla dello spessore variabile tra 5 e 7 m.

Alla profondità di circa 100 m dal piano campagna tutti i pozzi individuano un livello continuo di argilla e argilla sabbiosa dello spessore di circa 10-12 m. I pozzi Bosco, S. Lorenzo 9 e S. Lorenzo 11, più profondi, mostrano tra i 100 e i 165 m da p.c. l'alternanza di livelli a granulometria fine (argilla, argilla sabbiosa) e livelli a granulometria più grossolana (sabbia e ghiaia), entrambi di buona continuità laterale.

La falda è posizionata a circa 166 m l.m.m. nel settore settentrionale e a circa 161 m l.m.m. in quello meridionale.

I pozzi meno profondi captano a profondità variabili tra 40 e 80 m dal p.c., all'interno dell'acquifero superiore, mentre quelli più profondi captano nell'acquifero inferiore.

SEZIONE B-B'

La sezione B-B' si sviluppa da W a E ed interseca il corso del fiume Olona.

Nell'area affiorano i depositi del Livello Fondamentale della pianura e quelli alluvionali del fiume Olona. Lo spessore di questi ultimi, sulla base sia della stratigrafia del pozzo del consorzio depuratore nord Milano sia della geometria dell'alveo dell'Olona, è stimato in circa 12-15 m.

Data l'assenza, in questo settore, di pozzi sufficientemente profondi a ovest del fiume Olona, non è stato possibile effettuare delle correlazioni significative tra l'area occidentale, in destra idrografica, e l'area orientale, in sinistra idrografica.

Il livello di falda è posto alla quota di 161-162 m l.m.m.

SEZIONE C-C'

La sezione ha andamento WNW-ESE ed è orientata trasversalmente al corso d'acqua. Gli unici pozzi presenti nell'area sono il pozzo denominato Palazzini Manif, in destra idrografica, e il pozzo Battisti 2, in sinistra idrografica.

Entrambi i pozzi individuano il tetto dell'acquifero inferiore; il primo pozzo ad una profondità di circa 75 m da p.c., il secondo a circa 85 m da p.c.. Nell'acquifero superiore sono presenti rare ed isolate lenti di materiale fine, in prevalenza argilloso.

La falda si trova a circa 164-165 m l.m.m..

SEZIONE D-D'

La sezione C-C' si sviluppa da WNW a ESE, attraversa il fiume Olona ed interessa i depositi del Livello Fondamentale della Pianura e quelli alluvionali dell'Olona.

I pozzi Europa e Battisti Torre individuano un livello di materiale fine, prevalentemente argilloso, a circa 45 m dal piano campagna, dello spessore di circa 5 m, mentre il pozzo Palazzini Manif individua un livello di argilla dello spessore di circa 4 m alla profondità di 70 m da p.c.: i due livelli non sembrano apparentemente correlabili.

Tutti i pozzi individuano il tetto dell'acquifero inferiore, posizionato a circa 75 m da p.c. in sinistra idrografica e a circa 85 m da p.c. in destra idrografica.

La falda si trova a circa 164-165 m s.l.m.m..

Le sezioni ricostruite sono state confrontate con quanto riportato in bibliografia, in particolare con gli studi effettuati nel 1995 dalla Provincia di Milano in collaborazione con il Politecnico di Milano dal titolo "Le risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano Vol. 1: Lineamenti idrogeologici", nell'ambito del quale sono state eseguite numerose sezioni ad andamento N-S ed W-E lungo tutto il territorio milanese. Confrontando queste sezioni con quelle eseguite nell'ambito del presente lavoro emergono alcune differenze: in particolare le sezioni della Provincia riportano per l'area in esame la presenza nel sottosuolo di numerosi livelli di limo aventi spessore compreso tra 10 e 15 m e presenti a profondità variabili tra 20 e 70 m dal piano campagna; tali livelli non vengono individuati dalle stratigrafie utilizzate ubicate nei territori di Parabiago e di S.Vittore Olona.

12. VERIFICHE DI STABILITA'

Il progetto delle opere di laminazione delle piene del Fiume Olona nei Comuni di Cane-grate, Legnano, Parabiago e S. Vittore Olona comprende una serie di lavori ed opere tecnicamente piuttosto semplici. In particolare la creazione di aree golenali e casse di laminazione attraverso movimenti materie per circa 1.000.000 mc, oltre a strutture per il controllo e la gestione del livello delle acque nell'Olona e dentro alle casse.

In particolare si prevede la realizzazione di alcuni argini per i quali, nel presente capitolo, si procede alle verifiche di stabilità.

La sezione presa a riferimento è quella concernente il rilevato di massima altezza. Delimita la cassa di laminazione di valle in sinistra idrografica, si trova nel Comune di S. Vittore Olona ed è la sezione numero 7.

L'argine ha un'altezza massima di circa 4,28 m, e sarà realizzato con materiale granulare (ghiaie e sabbia debolmente limosa) proveniente dagli scavi, adeguatamente rullato e costipato.

Secondo le indicazioni contenute nelle NTC le verifiche di sicurezza agli stati limite ultimi (SLU) devono soddisfare la seguente condizione:

$$Ed \leq Rd$$

Essendo:

- Ed il valore di progetto dell'azione o degli effetti delle azioni;
- Rd il valore di progetto della resistenza del terreno.

Rimandando alle NTC per un maggiore grado di dettaglio, le verifiche allo SLU sono condotte secondo l'approccio 1 (paragrafo 6.8.2 delle NTC):

Combinazione 2: (A2+M2+R2)

tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle tabelle 6.2.I e 6.2.II e 6.8.I delle NTC, riportate in seguito e valide rispettivamente per le azioni permanenti e variabili (A), per i parametri del terreno (M) e per le resistenze (R) (tabelle 14-14-15 del testo).

Carichi	Simbolo	Coefficiente parziale A2
Permanente favorevole	γ_{g1}	1.0
Permanente sfavorevole		1.3
Variabile favorevole	γ_{qi}	0.0
Variabile sfavorevole		1.3

Tabella 13. Verifiche a SLU. Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (A).

Parametro	Coefficiente parziale γ_m (M2)
Tangente dell'angolo d'attrito	1.25
Coesione efficace	1.25
Resistenza non drenata	1.40
Pso dell'unità di volume	1.00

Tabella 14 Verifiche a SLU. Coefficienti parziali per i parametri del terreno (M)

Coefficiente	R2
γ_r	1.1

Tabella 15 Verifiche a SLU. Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e fronti di scavo (R).

Nel seguente prospetto di tabella 16 sono sintetizzati i parametri geotecnici caratteristici (pedice k) e di calcolo (pedice d) che si ritiene di poter attribuire ad un rilevato costituito da materiale granulare adeguatamente rullato, ed al terreno di sedime ghiaioso sabbioso limoso.

MATERIALE	c'_k (KpA)	Φ'_k (°)	c'_d (KpA)	Φ'_d (°)
Corpo del rilevato	2,0	30	1,6	24,8
Sottosuolo	3,0	32	2,4	26,2

Tabella 16. Analisi di stabilità globale. Parametri geotecnici caratteristici e di calcolo

Le successive analisi di stabilità rientrano in verifiche allo SLU; le azioni variabili sono rappresentate dal solo (eventuale) sovraccarico sulla strada di servizio per il quale è stata assunta una pressione distribuita pari a:

$$20 \times 13 = 26 \text{ kPa nel caso statico;}$$

$$20 \text{ kPa nel caso sismico.}$$

La verifica del sistema geotecnico sotto l'effetto dell'azione sismica è stata eseguita allo SLU ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni, impiegando i parametri geotecnici ridotti dei coefficienti M2, ed adottando le resistenze di progetto con il valore parziale di tabella 15, così come indicato nella Circolare esplicativa n 617 del 02/02/2009.

I coefficienti sismici K_h e K_v sono stati assunti pari a 0,0012 e 0,006, come illustrato al paragrafo 9.1, e sono relativi ad una categoria di suolo di fondazione C.

Le verifiche sono state effettuate con il programma GS STABLE 7 v2 della Gregory Geotechnical Software. La verifica è imposta sulla parte esterna del rilevato essendo quella interna (verso il fiume Olona) caratterizzata da una banca che determina un vantaggio nelle condizioni di stabilità.

Il minor coefficiente di sicurezza, per una superficie di scivolamento circolare determinata secondo il criterio di Bishop, è sempre superiore al minimo di normativa con 1,36 in assenza di sisma e 1,20 con sisma, così come risulta dalle seguenti figure 31 e 32.

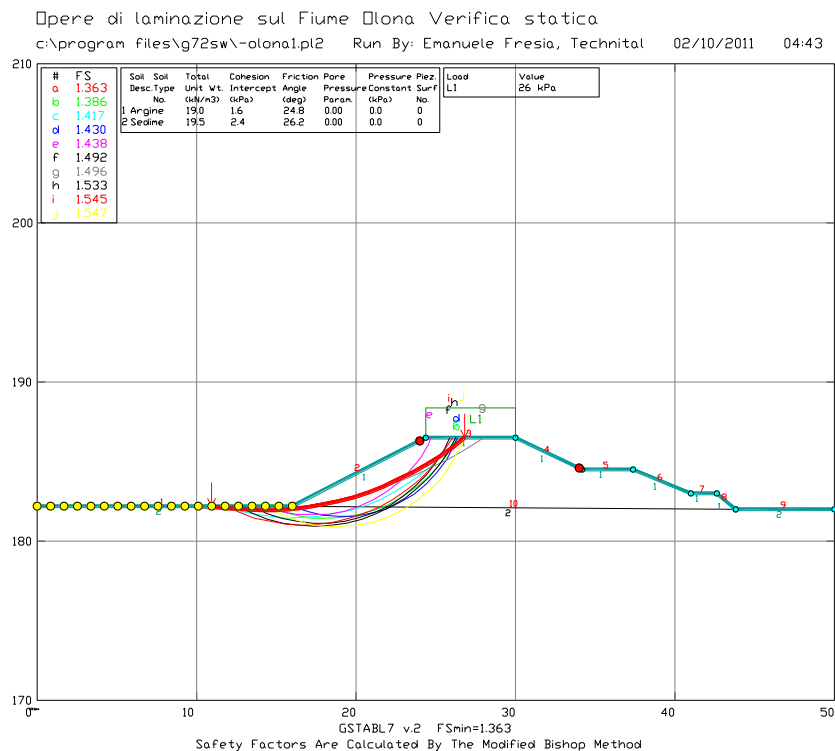


Figura 31. Verifica di stabilità in assenza di sisma. Fs minimo 1,36

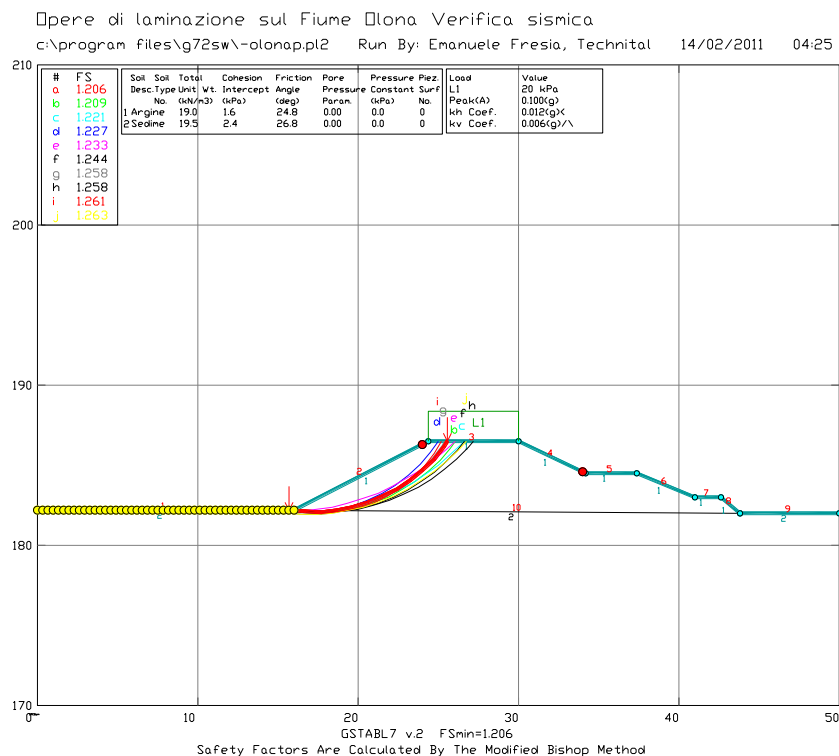


Figura 32. Verifica di stabilità in presenza di sisma. Fs minimo 1,20

13. BIBLIOGRAFIA

- A.A. Vari (1985) - Studi idrogeologici della Pianura Padana, CLUP Milano.
- AGIP (1990) - “Geologia d’Italia”, Documenti Cedi/3, San Donato Mil., Milano.
- Barnaba P.F. (2001): - “I movimenti della falda freatica nel sud-est milanese tra il 1997 e il 2001” – “Acque sotterranee”, Fascicolo 70, Anno XVIII, Milano.
- Bortolani, Braga, Dal Pra’, Francovilla, Giuliano, Manfredini, Petrucci, Pozzi, Stefanini, Vuillermin (1983): - “Lineamenti idrogeologici della Pianura Padana” – I.R.S.E., Istituto di ricerche sulle acque, 53.
- Desio A. (1938) - “Caratteri fisici e geologici della Provincia di Milano”, “Estratto dagli annali della sperimentazione agraria”, Volume XXXII – A. XVII.
- E.R.S.A.L. (1993): - Progetto “Carta Pedologica” – “I suoli del Parco Agricolo Sud Milano”.
- Francani V., Pozzi R., (1981) - “Condizioni di alimentazione delle riserve idriche del territorio Milanese”, La Rivista della Strada, L303, Milano.
- I.R.S.A. (1979) - “Lineamenti idrogeologici della Pianura Padana”, Quaderni I.R.S.A., n. 28 (II), Roma.
- Martinis B., Robba E., (1978) - Contributo alla stratigrafia dei depositi Quaternari del sottosuolo di Milano, Riv. It. Paleont., Vol. 84, Milano.
- Ordico E. (1957) - “Il sottosuolo di Milano”. Istituto di Geologia, Geografia Fisica e Paleontologia dell’Università di Milano
- Panizza M. (1993) - “Geomorfologia applicata, Metodi di Applicazione alla Pianificazione Territoriale e alla Valutazione d’Impatto Ambientale”, La Nuova Italia Scientifica.
- Provincia di Milano (2000) - “Le risorse idriche sotterranee della Provincia di Milano”, Volume 2, Rapporto sullo stato di inquinamento, Anni 1990-1996-1997.
- Provincia di Milano (1996) - “Le risorse idriche sotterranee della Provincia di Milano”, Volume 1, Lineamenti idrologici (Dicembre 1995).
- Regione Lombardia (1976) - “Lineamenti geologici – Stratigrafia e tettonica” da Carta della Montagna.

- E.R.S.A.F. (2001) - Carta dei suoli della Lombardia
- Veggiani A. (1982) - “Variazioni climatiche e dissesti idrogeologici nell’alto medioevo in Lombardia e la rifondazione di Lodi”, *Sibrium*, 16, 199-208.

ALLEGATO 1: Analisi della filtrazione del corpo arginale

1. ANALISI DI FILTRAZIONE ATTRAVERSO L'ARGINE DELLE CASSE DI ESPANSIONE DEL FIUME OLONA

È stato sviluppato, per l'analisi di filtrazione attraverso l'argine di contenimento delle casse di espansione del fiume Olona, un modello matematico di calcolo bidimensionale ad elementi finiti.

Lo scopo è stato quello di determinare il flusso di filtrazione attraverso l'argine della cassa di espansione, in condizioni di terreno parzialmente saturo e di completo riempimento della cassa di espansione.

L'argine si trova in condizioni di parziale saturazione in quanto la quota della falda indisturbata è di circa – 20 m dalla base dell'argine.

Ai fini del calcolo, si è individuata la sezione della cassa di espansione sottoposta alle condizioni più gravose in termini di carico piezometrico.

Essa è caratterizzata da un argine di altezza pari a circa 4.50 m, sagomato mediante 2 berme sul lato interno della cassa di espansione. La larghezza dell'argine al piede è di circa 27 m.

In corrispondenza della suddetta sezione, il livello di riempimento nella cassa di espansione raggiunge la quota di 3 m dal piede dell'argine; si tratta della condizione di maggiore dislivello a cui è sottoposto l'argine (dal valore di 3 m all'interno della cassa al valore nullo all'esterno).

La cassa si considera piena per un periodo massimo di 3 giorni; le analisi di filtrazione sono state svolte in condizioni transitorie analizzando i risultati in particolare dopo 3 giorni.

1.1. Codice di calcolo

Il codice di calcolo utilizzato per la modellazione in oggetto è il FEFLOW 5.4 (Finite Element Flow), sviluppato dalla WASY GmbH. Si tratta di un modello matematico bi- e tridimensionale agli elementi finiti, da oltre 20 anni disponibile sul mercato.

FEFLOW 5.4 è uno dei più sofisticati pacchetti di modellazione di acque sotterranee attualmente disponibile in commercio. Il programma fornisce un ambiente grafico bi- e tridimensionale avanzato per effettuare la modellazione del campo di moto di acque sotterranee, trasporto degli agenti inquinanti e trasporto di calore.

Si tratta di un codice di calcolo piuttosto avanzato dal punto di vista numerico-computazionale, ed è dotato di diversi algoritmi di soluzione numerica, tra cui risolutori iterativi veloci e diretti.

Dispone inoltre di avanzati algoritmi per la generazione della mesh di calcolo, in grado di garantirne il controllo in termini di dimensioni, orientamento e densità degli elementi.

Questo soprattutto in funzione all'”alleggerimento” del modello dal punto di vista numerico-computazionale.

1.1.1. Caratteristiche generali

Le caratteristiche generali del codice di calcolo FEFLOW 5.4 possono essere così schematicamente riassunte:

- modellazione bi- e tridimensionale agli elementi finiti, con possibilità di scelta tra elementi prismatici a base triangolare o quadrangolare;
- analisi di calcolo a moto permanente o a moto vario, con possibilità di definizione di condizioni al contorno variabili nel tempo;
- ampia gamma di algoritmi di risoluzione numerica, con possibilità di gestione delle modalità numerico-computazionali in funzione del grado della precisione di calcolo che si vuole raggiungere;
- validi algoritmi per la generazione della mesh di calcolo, con possibilità di controllo della discretizzazione del dominio in termini di dimensioni, orientamento e densità degli elementi;
- analisi geostatistica del dato di input, con possibilità di scelta tra un'ampia gamma di interpolatori spaziali;
- gestione informatizzata del dato, con possibilità di interfaccia con i più comuni software disponibili sul mercato (ArcInfo, ArcView, MapInfo GIS);
- modellazione avanzata dell'idrodinamica nella zona a parziale saturazione;
- avanzate modalità di output, visualizzazione bi- e tridimensionale dei risultati, con possibilità di controllo in tempo reale dell'evoluzione dell'analisi di calcolo.

Il codice di calcolo è in grado di simulare scenari che tengano in considerazione i processi di infiltrazione di acque meteoriche ed i processi di evapo-traspirazione.

Il software è stato studiato per essere interfacciato con i più importanti ed avanzati programmi disponibili sul mercato, per l'importazione, le georeferenziazione e la gestione informatizzata dei dati in generale, quali ArcInfo, ArcView, o MapInfo GIS. L'ambiente grafico e l'ambiente di gestione-importazione dei files di input è in continuo aggiornamento, consentendo quindi di recepire le sempre nuove e sviluppate tecnologie di raccolta, gestione ed informatizzazione dei dati.

FEFLOW è dotato di una versatile modalità di output, che consente di conoscere puntualmente nello spazio e nel tempo, anche nel corso dello svolgimento delle analisi di calcolo, il campo di moto in termini di potenziale idraulico e pressioni neutre. L'ambiente di output è stato dunque concepito in maniera tale da agevolare l'utente nelle fasi di calibrazione e taratura del modello, potendo disporre di una vasta gamma di grandezze diagrammate in tempo reale, che consentono un controllo immediato dell'analisi di calcolo.

1.1.2. Dominio di calcolo e generazione della mesh

FEFLOW schematizza il terreno mediante elementi finiti bi-tridimensionali, consentendo una avanzata discretizzazione del dominio da modellare.

Il codice di calcolo è dotato di una vasta selezione di risolutori numerici per effettuare la modellazione bi-tridimensionale di elementi finiti complessi, e di flusso permanente o transiente di acque sotterranee, e del trasporto degli agenti inquinanti.

La generazione della mesh di calcolo può essere parzialmente o completamente realizzata in automatico. Il software dispone di una vasta gamma di opzioni per l'algoritmo di generazione della mesh, che consentono un dettagliato controllo sulla geometria della stessa in termini di dimensioni, orientamento e densità degli elementi.

FEFLOW dispone inoltre di un'interfaccia grafica mediante la quale, in qualsiasi fase dell'analisi di calcolo, è possibile rifinire la mesh manualmente.

Una volta definito il dominio di calcolo e la geometria degli elementi, il secondo passo nell'allestimento del modello richiede la generazione della griglia bidimensionale.

L'obiettivo principale è quello di garantire un sufficiente grado di dettaglio ma allo stesso tempo non appesantire eccessivamente dal punto di vista numerico-computazionale il modello di calcolo.

FEFLOW dispone di un valido algoritmo di generazione della mesh, che consente di sviluppare una griglia di calcolo, in grado di riprodurre dettagliatamente la geometria del dominio di calcolo, in relazione agli elementi presenti. La generazione della griglia bidimensionale di calcolo, nel caso in oggetto, è avvenuta in maniera semiautomatica. Sono stati infatti inseriti manualmente una serie di "macro-elementi" in relazione ai quali si è imposto all'algoritmo di generazione della mesh di raffinare la griglia di calcolo. La procedura secondo cui si è "forzato" l'algoritmo di generazione della mesh, ha seguito alcuni criteri, funzionali alla creazione di zone di maggior dettaglio della griglia di calcolo, con riferimento in particolare al corpo arginale.

1.1.3. Condizioni iniziali e condizioni al contorno

Nelle analisi di calcolo effettuate in regime transitorio, note le distribuzioni spaziali di potenziale idraulico, concentrazione di determinati analiti e temperatura, il codice di calcolo FEFLOW consente di definire le condizioni iniziali in termini di flusso, trasporto di massa e trasporto di calore.

Il software dispone di un'interfaccia grafica semplice ed immediata per l'assegnazione delle condizioni iniziali.

FEFLOW consente di assegnare condizioni iniziali costanti su tutto il dominio di calcolo, oppure variabili spazialmente, con la possibilità di assegnarle manualmente nodo per nodo o elemento per elemento.

Il programma offre inoltre la possibilità di definire le condizioni iniziali direttamente mediante l'importazione di files numerici del tipo x,y,z,h con h =condizione iniziale di potenziale idraulico noto.

Nel caso di flusso in condizioni di mezzo parzialmente saturo, il programma consente, in alternativa, di assegnare le condizioni iniziali in termini di *grado di saturazione* o di *contenuto volumetrico d'acqua*.

Come detto, FEFLOW è dotato di diversi algoritmi per l'interpolazione geostatistica dei valori puntuali di condizioni iniziali assegnate, tra i quali si possono elencare il metodo del KRIGING, il metodo di AKIMA (lineare o cubico), il metodo dell'*inverso della distanza al quadrato*.

Analogamente a quanto detto per le condizioni iniziali, il software dispone di un'interfaccia grafica che consente di assegnare le condizioni al contorno manualmente nodo per nodo, oppure di importarle mediante file numerico del tipo x,y,z,h con h =condizione al contorno di potenziale idraulico noto.

Il codice di calcolo FEFLOW offre la possibilità di assegnare 4 diversi tipi di condizioni al contorno:

- condizione al contorno del I° tipo (o di *Dirichlet*);
- condizione al contorno del II° tipo (o di *Neumann*);
- condizione al contorno del III° tipo (o di *Cauchy*);
- condizione al contorno del IV° tipo (punto sorgente o pozzo singolo);

Il software è in grado di effettuare analisi di calcolo dove le condizioni al contorno sono variabili nel tempo, secondo una funzione assegnata dall'utente. Questo consente di effettuare analisi di calcolo in grado di simulare forzanti di marea, prove di emungimento a portata variabile, tassi di ricarica per infiltrazione meteorica variabili ecc.

1.1.4. Risolutori numerici e controllo degli step temporali di calcolo

Il codice di calcolo FEFLOW è dotato di diversi tipi di risolutori numerici. In particolare, per la soluzione di problemi non lineari FEFLOW utilizza le tecniche iterative di Newton e Picard.

Il programma è inoltre dotato di risolutori iterativi veloci e diretti come il PCG o il Restarterd-OR-THOMIN, e, in alternativa, di risolutori algebrici multigrid (SAMG).

FEFLOW consente un completo controllo degli schemi di time-stepping con cui effettuare l'analisi di calcolo. In particolare il programma offre la possibilità di scegliere tra le seguenti opzioni:

- steps temporali di calcolo costanti;
- steps temporali di calcolo variabili e predefiniti dall'utente;
- procedure di time-stepping automatiche.

Il software dispone di un efficiente sistema di visualizzazione in tempo reale del processo di simulazione che consiste nelle finestre di controllo della *time-step history* di calcolo e della convergenza numerica.

1.1.5. Schematizzazione dell'idrodinamica nella zona a parziale saturazione

Occorre dedicare particolare attenzione alla schematizzazione del comportamento idraulico del terreno nella zona di parziale saturazione.

In tale zona, il comportamento idraulico del mezzo poroso è sostanzialmente diverso da quello che lo stesso assume in condizioni di totale saturazione.

Il comportamento idraulico del mezzo poroso in condizioni di parziale saturazione, viene descritto da una funzione nota in letteratura sotto il nome di Soil Water Characteristic Curve, altrimenti detta Volumetric Water Content Function. Tale curva viene determinata per via sperimentale, ed esprime il contenuto volumetrico d'acqua θ al variare del grado di suzione Ψ del terreno*.

Il codice di calcolo proposto dispone della possibilità di effettuare la schematizzazione della zona a parziale saturazione, mediante la definizione delle curve di ritenzione (*Soil Water Characteristic Function* e *Hydraulic Conductivity Function*) su tutta la mesh di calcolo.

In particolare, il codice di calcolo FEFLOW 5.4 dispone dei seguenti 6 modelli parametrici per la determinazione delle 2 curve:

- Van Genuchten
- Van Genuchten modificato

- Brooks and Corey
- Haverkamp
- Modello esponenziale
- Modello lineare

Una volta determinato per via sperimentale l'andamento delle curve di ritenzione, il codice di calcolo FEFLOW consente di effettuare l'analisi di calcolo utilizzando la *Soil Water Characteristic Function* (e quindi l'*Hydraulic Conductivity Function*) ricavata mediante uno dei modelli parametrici sopra riportato.

In Figura 1.1 è riportato un esempio di *Soil Water Characteristic Function* determinata sperimentalmente mediante prova di laboratorio; in Figura 1.2 è riportata la medesima curva, da utilizzare nell'analisi di calcolo, ricavata con FEFLOW mediante modello parametrico di Van Genuchten.

In Figura 1.3 è riportata la corrispondente *Hydraulic Conductivity Function* ricavata con FEFLOW mediante modello parametrico di Van Genuchten.

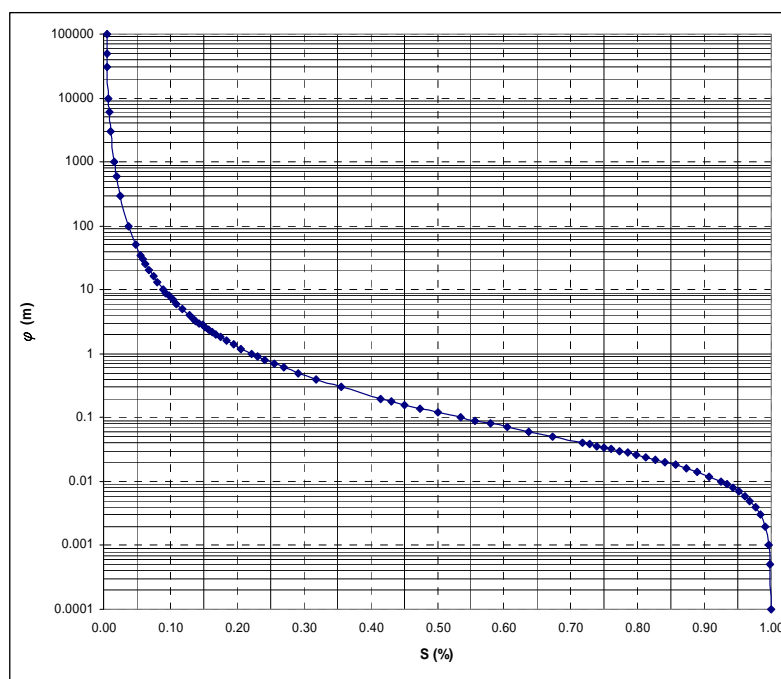


FIGURA 1.1 – ESEMPIO DI SOIL WATER CHARACTERISTIC FUNCTION
RICAVATA SPERIMENTALMENTE MEDIANTE PROVA DI LABORATORIO

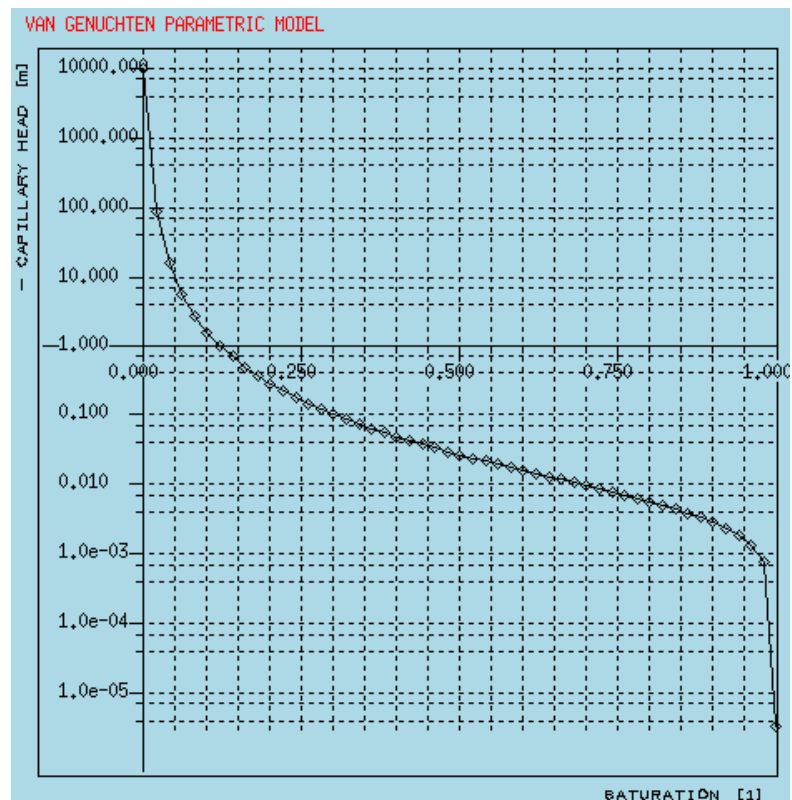


FIGURA 1.2 – ESEMPIO DI SOIL WATER CHARACTERISTIC FUNCTION
RIPRODOTTA CON FEFLOW MEDIANTE MODELLO PARAMETRICO DI
VAN GENUCHTEN

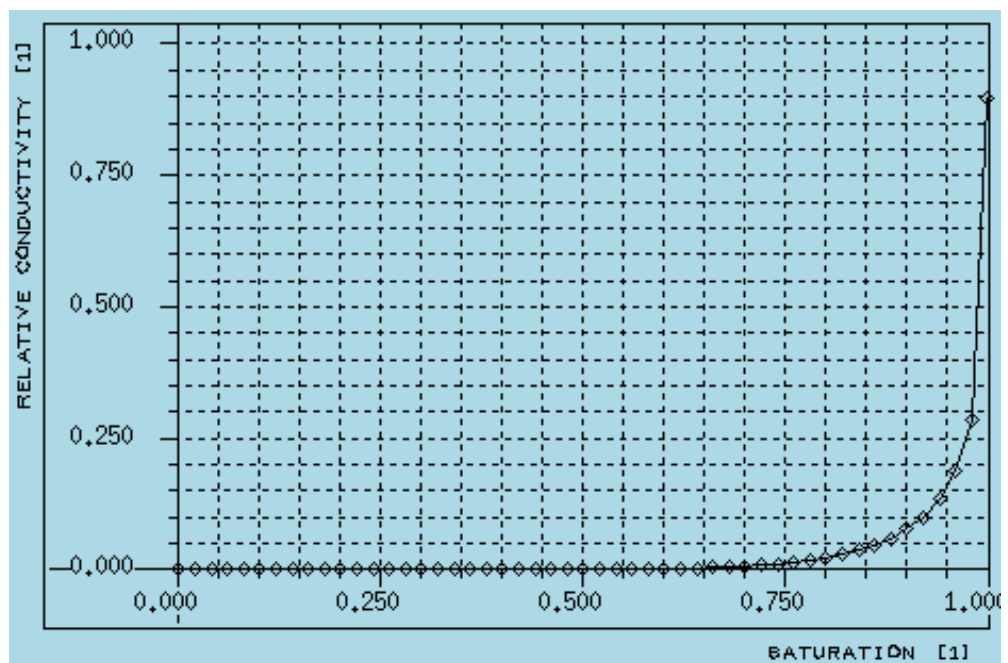


FIGURA 1.3 – ESEMPIO DI HYDRAULIC CONDUCTIVITY FUNCTION
RIPRODOTTA CON FEFLOW MEDIANTE MODELLO PARAMETRICO DI
VAN GENUCHTEN

1.1.6. Visualizzazione dei risultati

La visualizzazione dei risultati delle analisi di calcolo costituisce uno degli aspetti più importanti della modellazione numerico-matematica in generale.

Dall'interpretazione dei risultati dell'analisi di calcolo dipende infatti la verifica della corretta taratura del modello, in relazione ai dati puntuali di pressione e di livello piezometrico di cui si dispone.

Uno degli elementi che ha portato alla proposta del codice di calcolo FEFLOW 5.4 è l'efficiente interfaccia grafica di visualizzazione dei risultati di cui il programma dispone.

Una delle potenzialità di maggior interesse del codice di calcolo FEFLOW 5.4 è costituita dalla possibilità di effettuare un controllo dei risultati dell'analisi di calcolo in tempo reale.

FEFLOW 5.4 è in grado di diagrammare i valori puntuali di pressione neutra e carico idraulico totale nel corso dello svolgimento dell'analisi di calcolo. Tale modalità di output rappresenta uno strumento assai utile nelle fasi di calibrazione e taratura del modello, potendosi confrontare in tempo reale i valori risultanti dall'analisi numerica con i corrispondenti valori misurati.

In previsione di simulazioni numeriche da effettuarsi in regime di moto vario, di fatto onerose dal punto di vista computazionale, tale modalità di output costituisce uno strumento rapido e versatile per il progressivo affinamento del modello matematico. La possibilità di visualizzare istantaneamente i risultati dell'analisi numerica consente di fatto di effettuare le dovute correzioni al modello, senza dover attendere la fine dell'analisi di calcolo. Ciò costituisce indubbiamente uno dei grandi vantaggi del codice di calcolo proposto soprattutto in considerazione della complessità, dal punto di vista numerico-computazionale, del modello che si vuole configurare.

FEFLOW 5.4, inoltre, è in grado di fornire una visualizzazione bi- e tridimensionale del campo di moto, in termini di:

- distribuzione delle curve ad uguale potenziale idraulico;
- distribuzione delle curve ad uguale pressione neutra;
- distribuzione dei vettori velocità.

1.2. Scenari di modellazione

Sono state eseguite, per il caso di studio, due differenti schematizzazioni geometriche:

- modellazione dell'intera cassa di espansione (e di una porzione di territorio, su ciascun lato della cassa, pari a circa 2.5 volte la larghezza della cassa stessa) e del terreno sottostante fino ad una profondità di circa 100 m (Scenario 1 e 2);
- modellazione del solo argine nella condizione di livello massimo all'interno della cassa di espansione (Scenario 3 e 4).

Lo scopo dei differenti scenari di modellazione è stato calcolare il grado di saturazione nel tempo, a partire dalle condizioni al contorno assegnate e verificare che il paramento di valle dell'argine non sia interessato da fenomeni di filtrazione.

La prima schematizzazione geometrica sopra descritta è stata suddivisa in due differenti scenari, imponendo due differenti valori alla condizione al contorno individuata dal livello della falda indisturbata: - 20 m e - 5 m dal p.c.. Questo perché la natura degli acquiferi in oggetto è tale da poter ipotizzare anche escursioni di livello importanti. La condizione al contorno di livello di falda pari a -5 m da p.c. (Scenario 2) costituisce comunque una condizione limite per il caso in oggetto.

La seconda schematizzazione geometrica sopra descritta è stata a sua volta analizzata assegnando due differenti valori di permeabilità al terreno costituente l'argine.

Dopo lo Scenario n. 2, sviluppato su una condizione limite del livello di falda indisturbata, infatti, lo Scenario n. 3 presenta una condizione ancor più cautelativa: si ipotizza infatti che la differenza di carico idraulico totale monte – valle si possa dissipare all'interno del solo corpo arginale. A tale scopo è stato modellato il solo corpo arginale, la base del quale è assunta impermeabile; il flusso di filtrazione si instaura quindi interamente all'interno del corpo arginale. Lo scopo è verificare che la linea di filtrazione non raggiunga in 3 giorni il paramento di valle dell'argine.

Nello Scenario 3, la permeabilità dell'argine è stata assunta pari a 10^{-5} m/s (valore sicuramente cautelativo per un materiale granulare compattato).

L'ultimo caso analizzato si differenzia dal precedente unicamente per il valore di permeabilità dell'argine assegnato, pari a 10^{-6} m/s (Scenario 4).

La stratigrafia definita in corrispondenza della cassa di espansione è riportata in Tabella 10 e qui riproposta per comodità.

TABELLA 1.1: STRATIGRAFIA DEFINITA IN CORRISPONDENZA DELLA CASSA DI ESPANSIONE

DA (m da p.c.)	A (m da p.c.)	LITOLOGIA	K (m/s)
0	2	Limo sabbioso o argilloso	10^{-7}
2	15	ghiaia sabbiosa con ciottoli e limo	$5 \cdot 10^{-6}$
15	20	ghiaia sabbiosa con ciottoli e limo	$5 \cdot 10^{-5}$
20	500	ghiaia e sabbia debolmente limosa con ciottoli	10^{-4}

Il terreno è stato modellato a partire dal secondo livello, essendo la quota del fondo della cassa inferiore a 2 m dal p.c..

In totale, quindi, i quattro scenari modellati si riassumono come di seguito:

- 1) analisi bidimensionale di filtrazione attraverso gli argini della cassa di espansione e il fondo della cassa stessa in condizioni di massimo livello di riempimento della cassa, argine con permeabilità di 10^{-6} m/s e terreno sottostante con caratteristiche definite dalla Tabella 1.1; il livello della falda indisturbata è di -20 m dal p.c.;
- 2) analisi bidimensionale di filtrazione attraverso gli argini della cassa di espansione e il fondo della cassa stessa in condizioni di massimo livello di riempimento della cassa, argine con permeabilità di 10^{-6} m/s e terreno sottostante con caratteristiche definite dalla Tabella 1.1; il livello della falda indisturbata è di -5 m dal p.c.;
- 3) analisi bidimensionale di filtrazione attraverso l'argine della cassa di espansione in condizioni di massimo livello di riempimento della cassa e argine con permeabilità di 10^{-5} m/s;
- 4) analisi bidimensionale di filtrazione attraverso l'argine della cassa di espansione in condizioni di massimo livello di riempimento della cassa e argine con permeabilità di 10^{-6} m/s;

1.2.1. Scenario 1

Geometria del modello

Il modello bidimensionale prevede la schematizzazione dell'intera cassa di espansione (e di una porzione di territorio, su ciascun lato della cassa, pari a circa 2.5 volte la larghezza della cassa stessa) e del terreno sottostante fino ad una profondità di circa 100 m, secondo la stratigrafia definita dalla Tabella 1.1.

La geometria del dominio di calcolo è stata estesa in modo da poter ragionevolmente applicare sul bordo del modello una condizione al contorno di potenziale assegnato pari al livello di falda indisturbata di -20 m dalla base dell'argine, assunta come quota di riferimento (quota 0). Tale quota di falda è stata ragionevolmente assunta come quota media rappresentativa della falda sull'intero anno.

Gli argini sono costituiti da terreno a matrice prevalentemente sabbiosa derivante dagli scavi, e successivamente compattato; ad essi è stata assegnata una permeabilità di 10^{-6} m/s.

L'analisi è stata condotta in condizioni stazionarie e transitorie; il transitorio di calcolo è stato sviluppato fino ad un tempo $t = 4$ giorni (il periodo massimo di riempimento della cassa di espansione è di 3 giorni).

Condizioni al contorno

Come già descritto in precedenza, il codice di calcolo FEFLOW 5.4 offre la possibilità di assegnare 4 diversi tipi di condizioni al contorno:

- condizione al contorno del I° tipo (o di *Dirichlet*);
- condizione al contorno del II° tipo (o di *Neumann*);
- condizione al contorno del III° tipo (o di *Cauchy*);
- condizione al contorno del IV° tipo (punto sorgente o pozzo singolo).

Nel caso di flusso in condizioni di mezzo parzialmente saturo, come il caso in oggetto, il programma consente, in alternativa, di assegnare condizioni al contorno in termini di *grado di saturazione* o di *contenuto volumetrico d'acqua*.

Dispone inoltre della possibilità di effettuare la schematizzazione della zona a parziale saturazione, mediante la definizione delle curve di ritenzione (*Soil Water Characteristic Function* e *Hydraulic Conductivity Function*) su tutta la mesh di calcolo, secondo i 6 modelli parametrici:

- Van Genuchten
- Van Genuchten modificato
- Brooks and Corey
- Haverkamp
- Modello esponenziale
- Modello lineare.

Nel caso in esame, il modello matematico utilizzato necessita delle seguenti condizioni al contorno:

- Condizione di carico (di I tipo) detta di *seepage* lungo la scarpata esterna degli argini: la pressione è pari a quella atmosferica (l'altezza piezometrica h è pari alla quota geodetica z). A tale condizione è associata una “*constrain condition*”, ossia un vincolo che consente l'instaurarsi di una portata uscente dalla scarpata di valle dell'argine, ma non entrante;
- condizione di carico (di I tipo), in corrispondenza della scarpata interna dell'argine, pari al livello massimo di riempimento della cassa di espansione (+ 3 m dal piede dell'argine).
- condizione, al bordo del modello, di potenziale assegnato (condizione al contorno di I tipo) pari al livello di falda indisturbata (-20 m dal piede dell'argine).

I parametri di input dei materiali sono:

- permeabilità del terreno costituente l'argine: $K=10^{-6}$ m/s;
- permeabilità dei terreni sottostanti come da caratterizzazione riportata in Tabella 1.1.

Si riporta di seguito, in Figura 1.4, la distribuzione dei valori di permeabilità assegnati al modello.

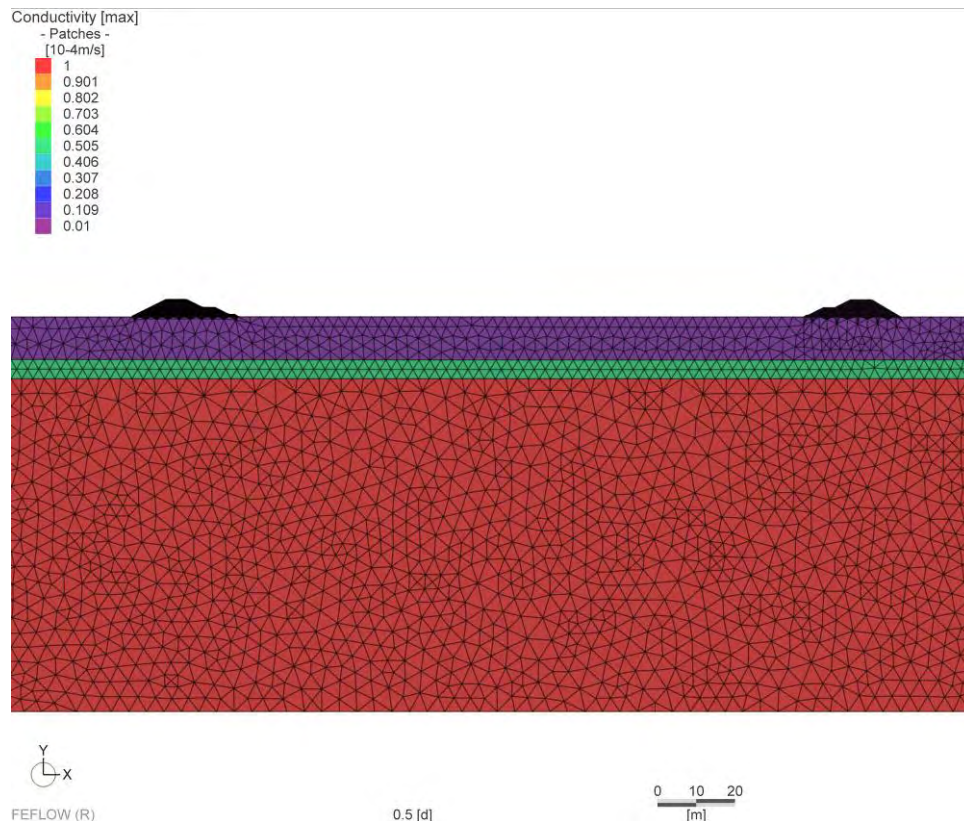


FIGURA 1.4 – DISTRIBUZIONE DEI VALORI DI PERMEABILITÀ ASSEGNATA

- coefficiente di immagazzinamento specifico del terreno (*specific storage*), assunto pari a 10^{-4} m^{-1} in funzione della tipologia di terreno adottata;
- curva di ritenzione idrica del terreno secondo il modello parametrico di Van Genuchten, desunta dallo Studio di infiltrazione redatto dal Politecnico di Milano nel dicembre 2005 allegato allo Studio di impatto ambientale approvato nel dicembre 2010.

Nella

Figura 1.5 si riportano le due curve di ritenzione limite del terreno ricavate sperimentalmente in laboratorio e la curva di ritenzione intermedia adottata.

In Figura 1.6 è riportata unicamente la curva di ritenzione intermedia adottata, e in

Figura 1.7 la stessa curva riprodotta all'interno del modello numerico – matematico.

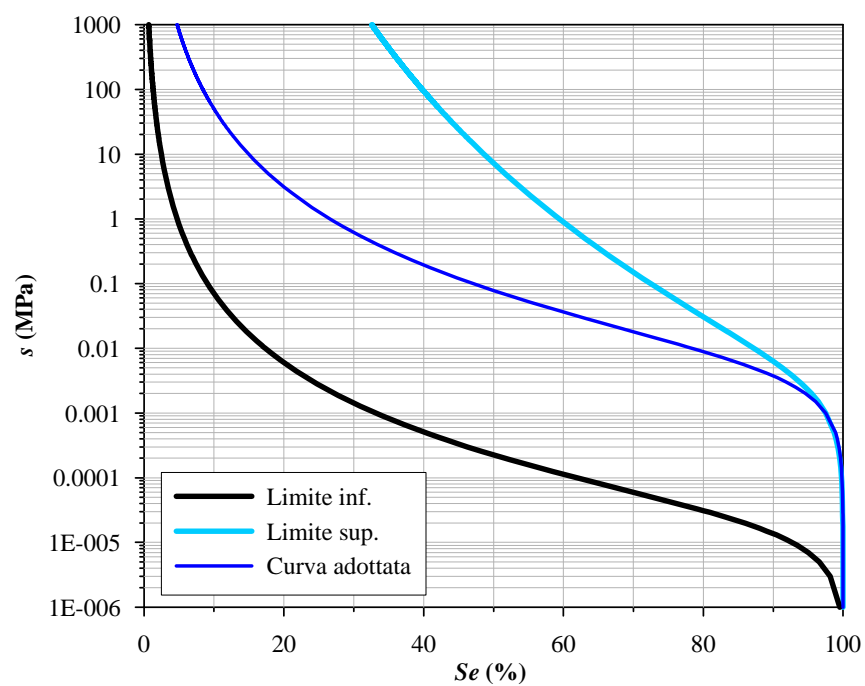


FIGURA 1.5 – CURVE DI RITENZIONE (SOIL WATER CHARACTERISTIC FUNCTION) LIMITE DEL TERRENO RICAVATE SPERIMENTALMENTE IN LABORATORIO E CURVA INTERMEDIA ADOTTATA

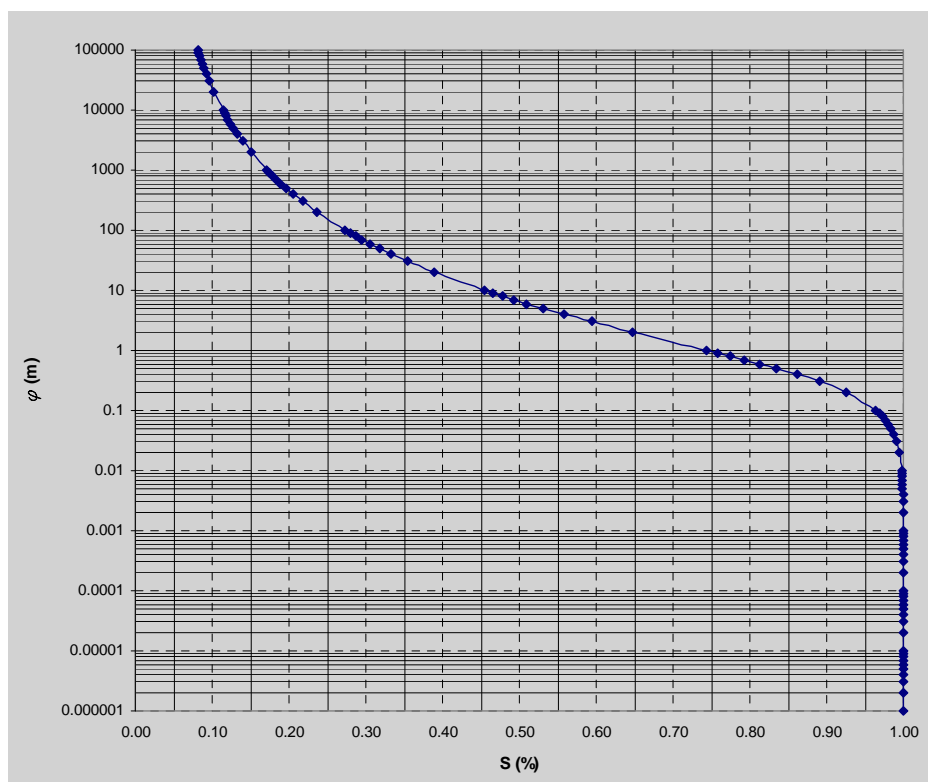


FIGURA 1.6 – SOIL WATER CHARACTERISTIC FUNCTION ADOTTATA

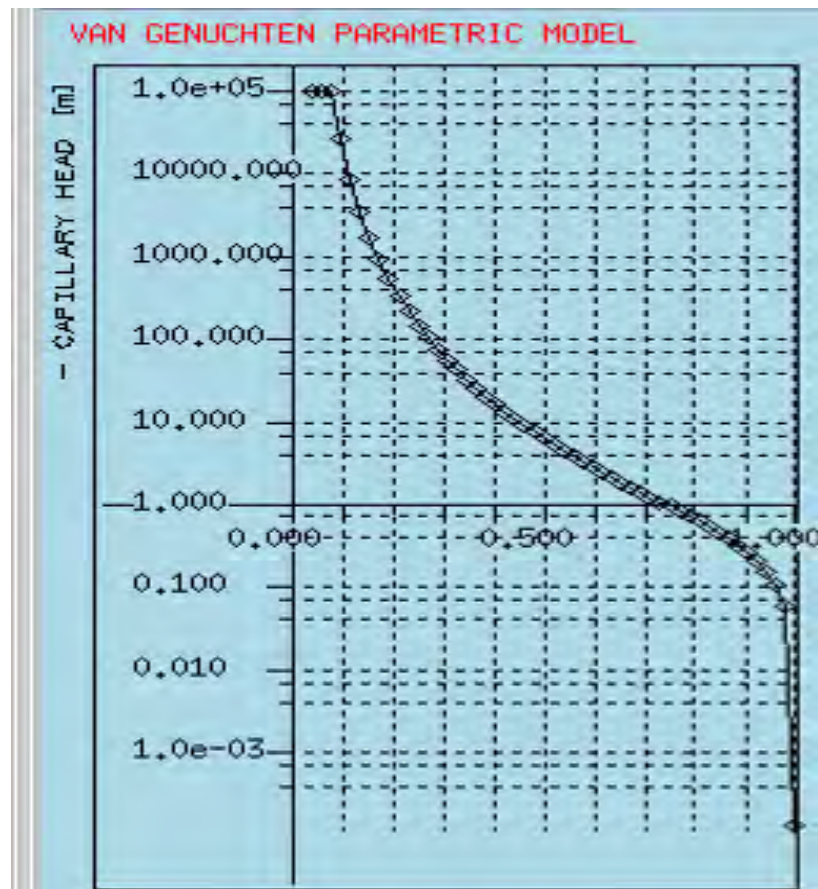


FIGURA 1.7 – SOIL WATER CHARACTERISTIC FUNCTION ADOTTATA
RIPRODOTTA CON FEFLOW MEDIANTE MODELLO PARAMETRICO DI
VAN GENUCHTEN

Fase di output – risultati ottenuti

L'analisi di filtrazione è stata condotta in regime transitorio, individuando la distribuzione del grado di saturazione all'interno dell'argine e nel terreno sottostante, e la distribuzione del carico idraulico totale.

Nella seguente sequenza di figure, dalla Figura 1.8 alla Figura 1.16, è riportata la distribuzione del grado di saturazione calcolata ogni 0.5 giorni dall'istante iniziale ad un tempo pari a 4 giorni.

Al di sotto del livello - 20 m dal piede dell'argine (soggiacenza della falda indisturbata) il grado di saturazione è pari a 1.

Si osserva l'avanzare della linea di filtrazione verso il basso; anche dopo 4 giorni, in ogni caso, non si verifica interferenza con la falda sottostante.

Si genera, pertanto, un flusso all'interno del terreno sotto la cassa, che non va ad interessare (nel transitorio di calcolo di 4 giorni) il livello freatico indisturbato.

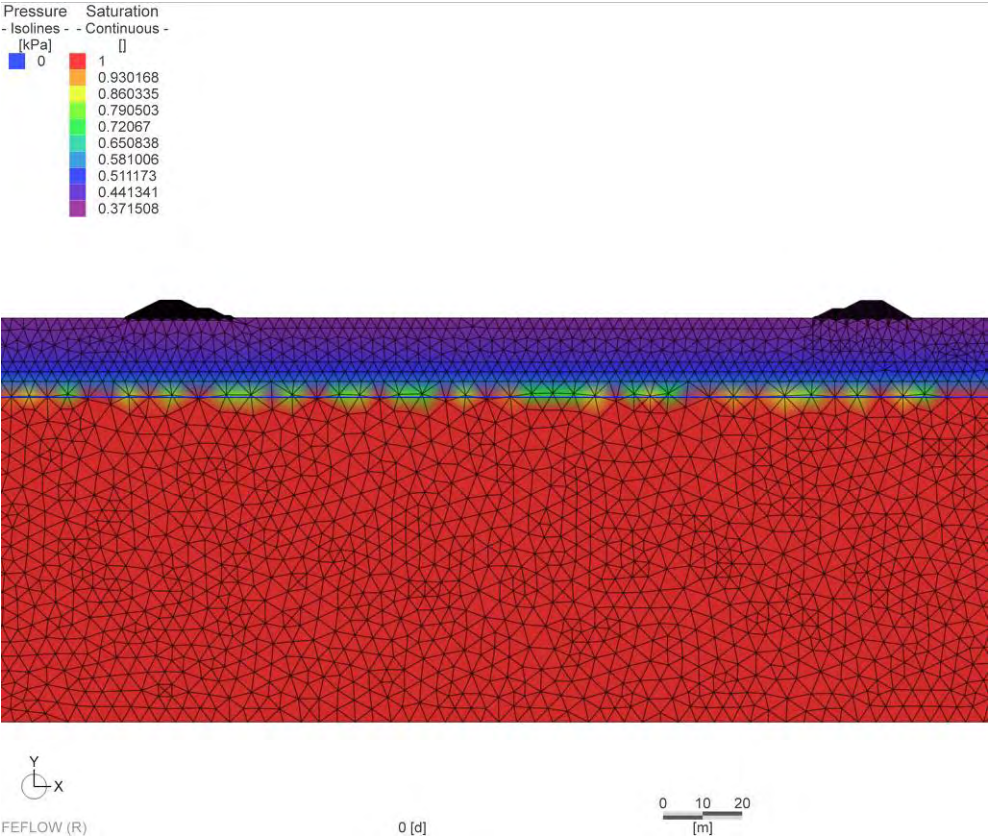


FIGURA 1.8 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 0 GIORNI

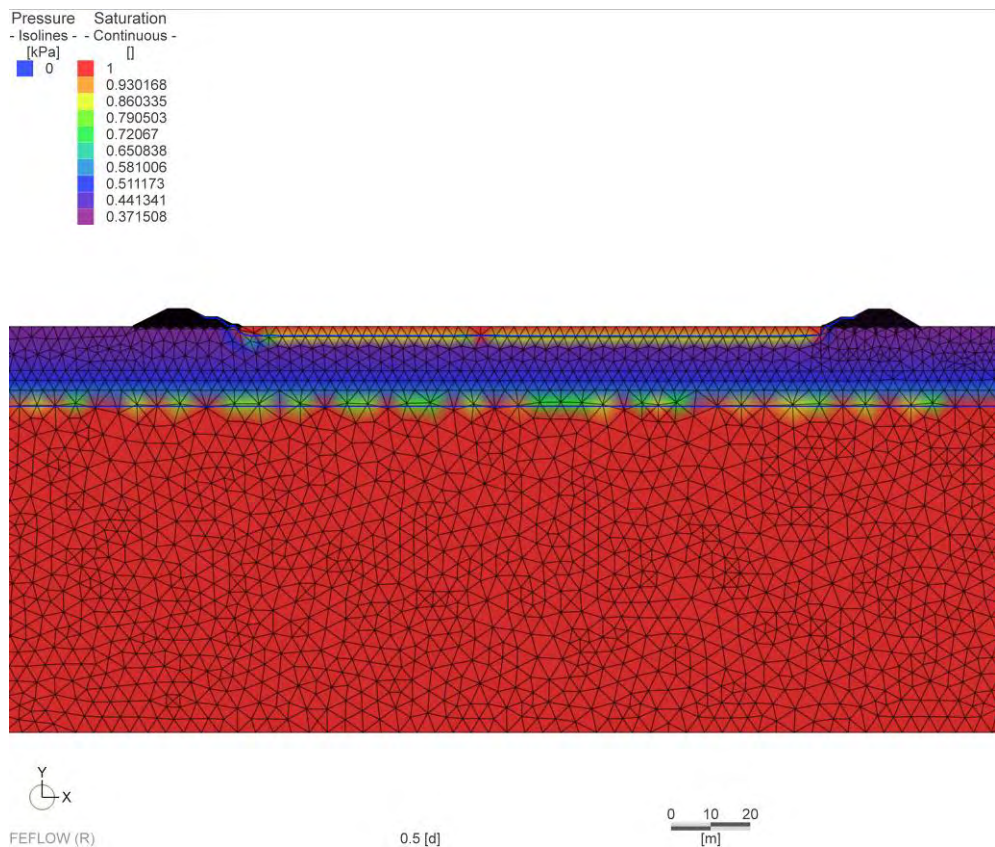


FIGURA 1.9 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 0.5 GIORNI

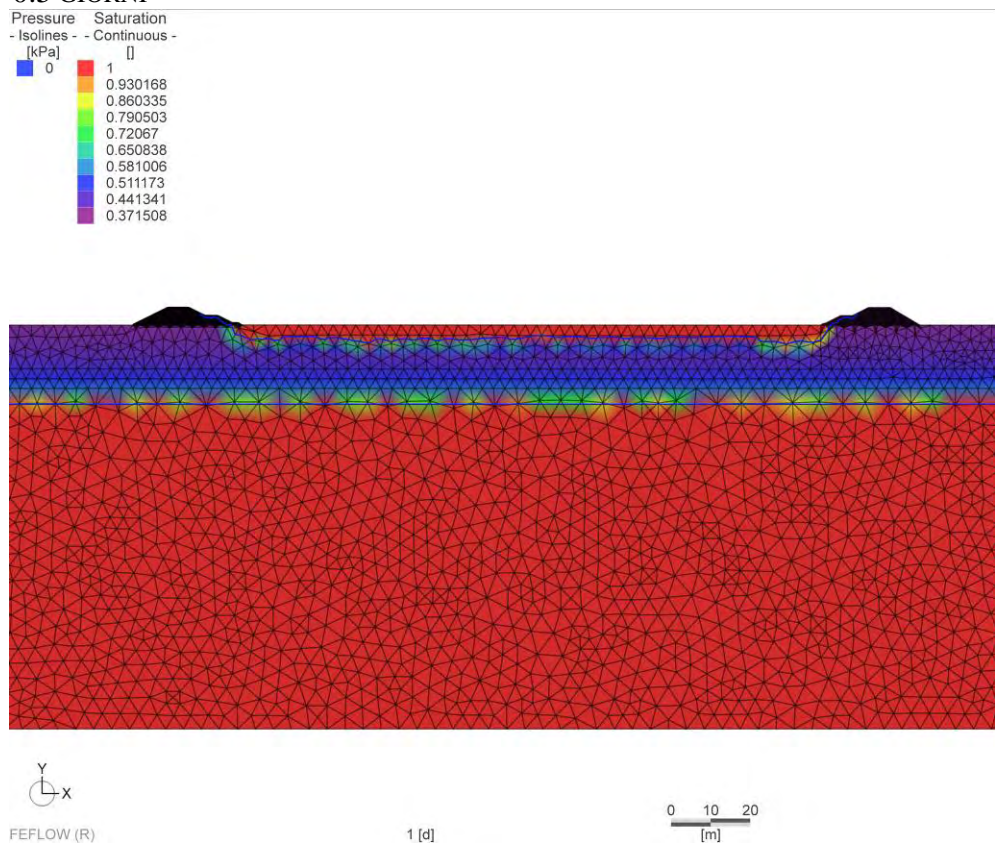


FIGURA 1.10 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 1 GIORNO

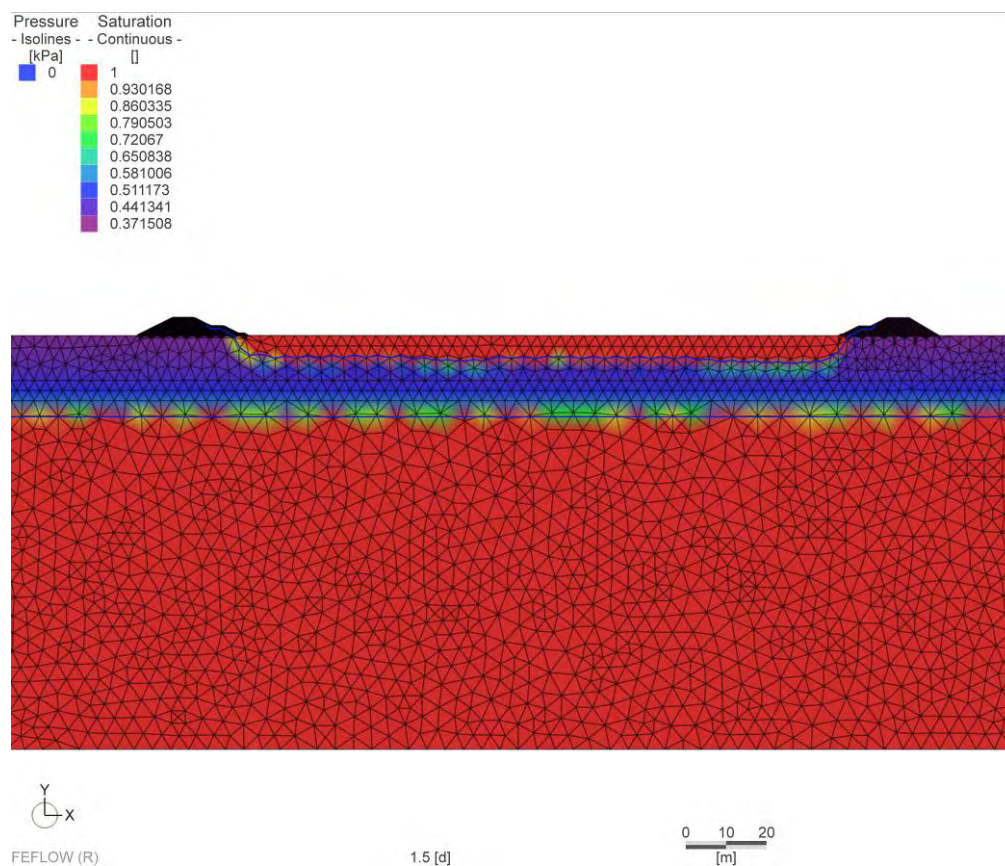


FIGURA 1.11 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 1.5 GIORNI

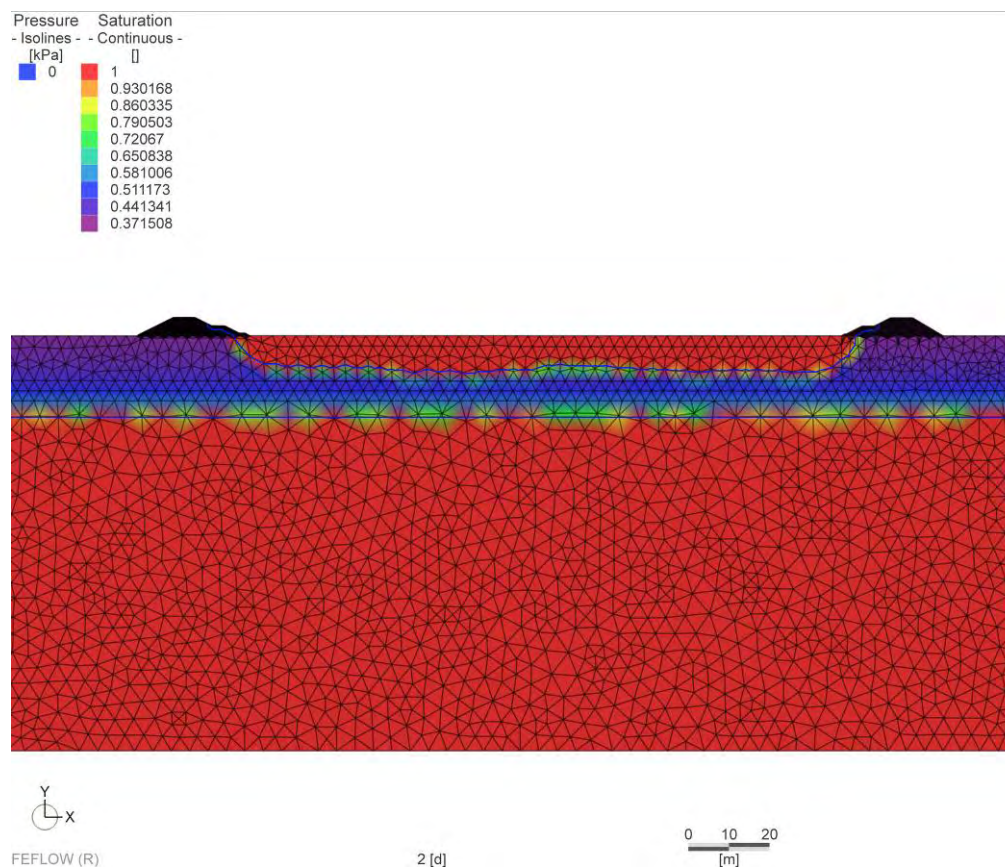


FIGURA 1.12 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 2 GIORNI

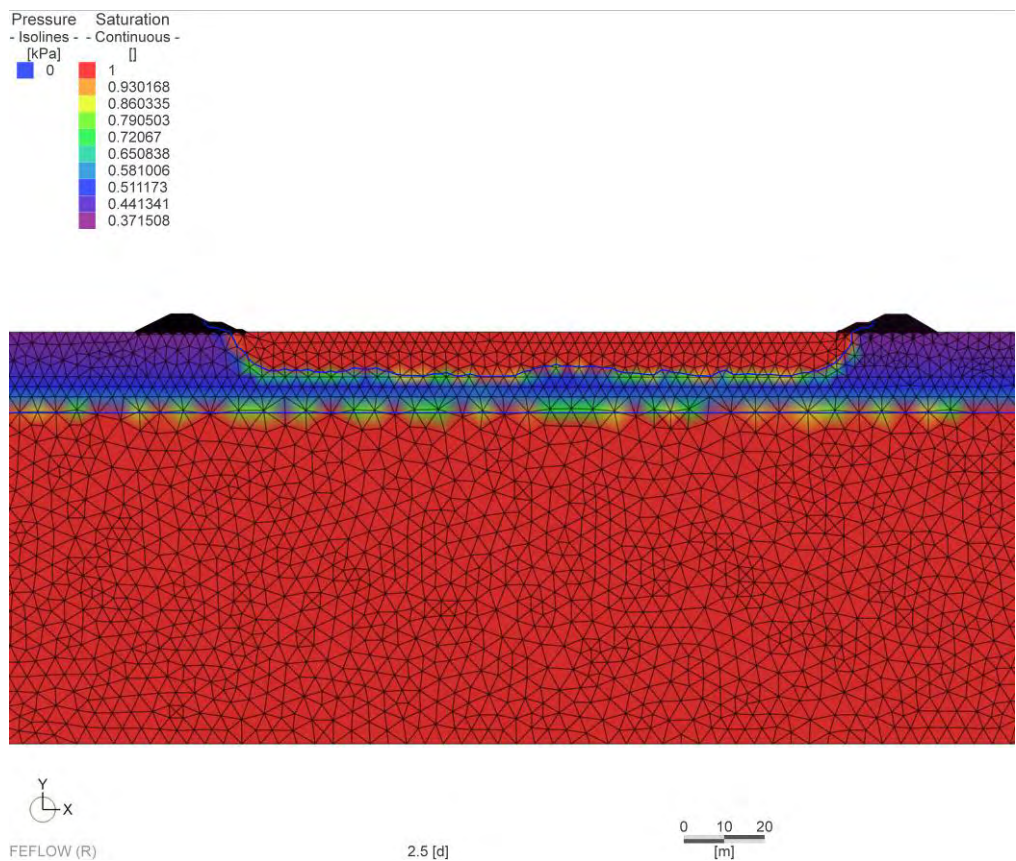


FIGURA 1.13 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 2.5 GIORNI

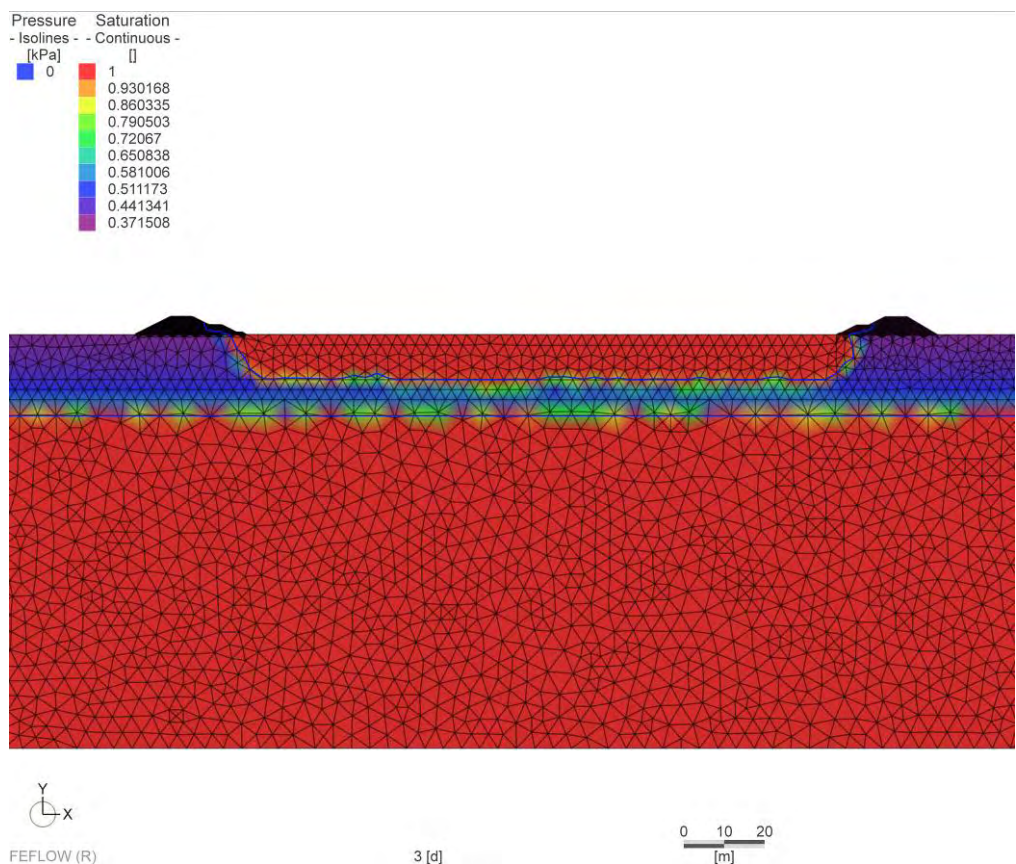


FIGURA 1.14 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 3 GIORNI

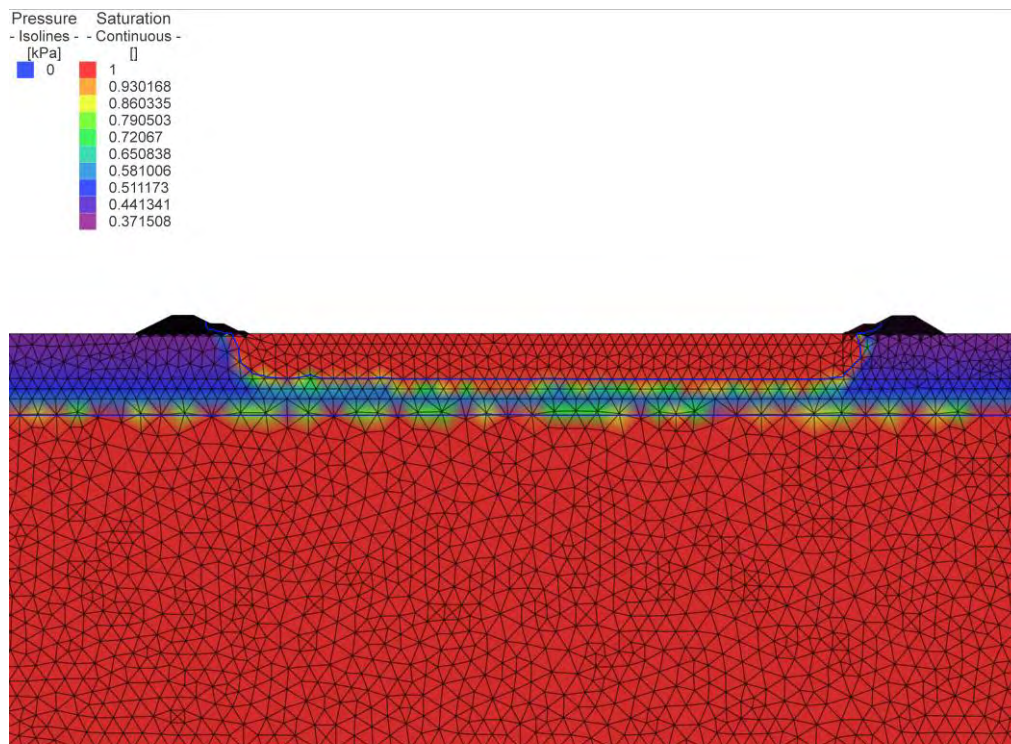


FIGURA 1.15 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 3.5 GIORNI

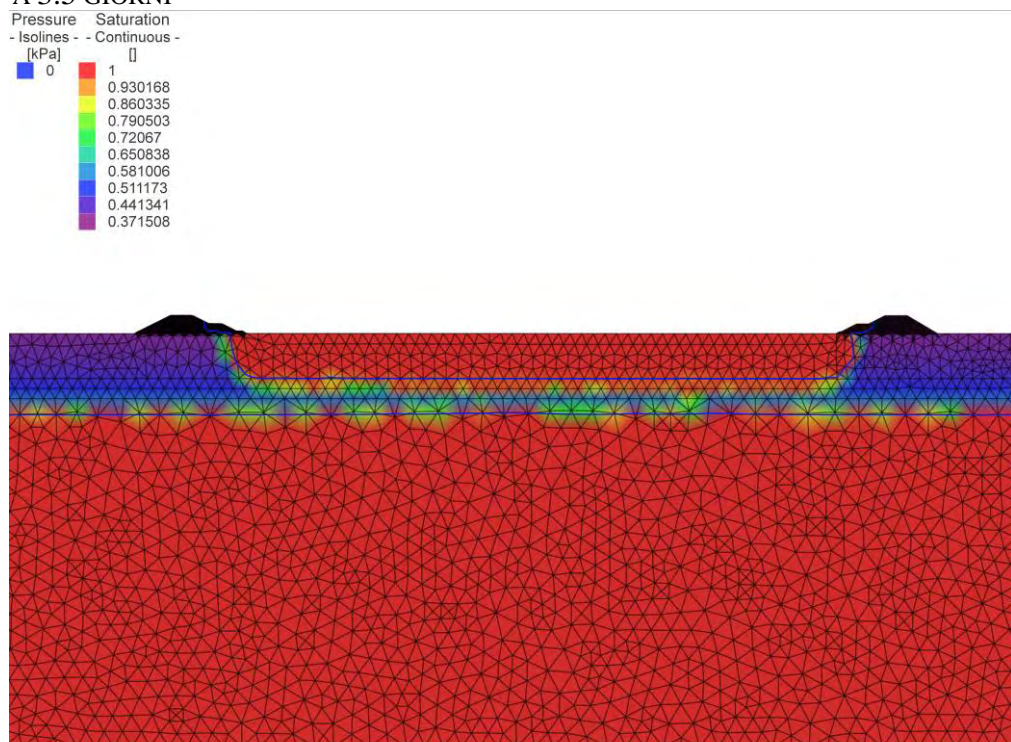


FIGURA 1.16 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 4 GIORNI

Nella seguente sequenza di figure, dalla Figura 1.17 alla Figura 1.21, è riportata la distribuzione del grado di saturazione calcolata all'interno dell'argine dall'istante iniziale ad un tempo pari a 4 giorni.

Si osserva l'avanzare della linea di filtrazione all'interno dell'argine (isobara corrispondente al valore 0).

Si osserva come, anche dopo 4 giorni, il fronte di filtrazione attraverso l'argine non raggiunga il paramento di valle.

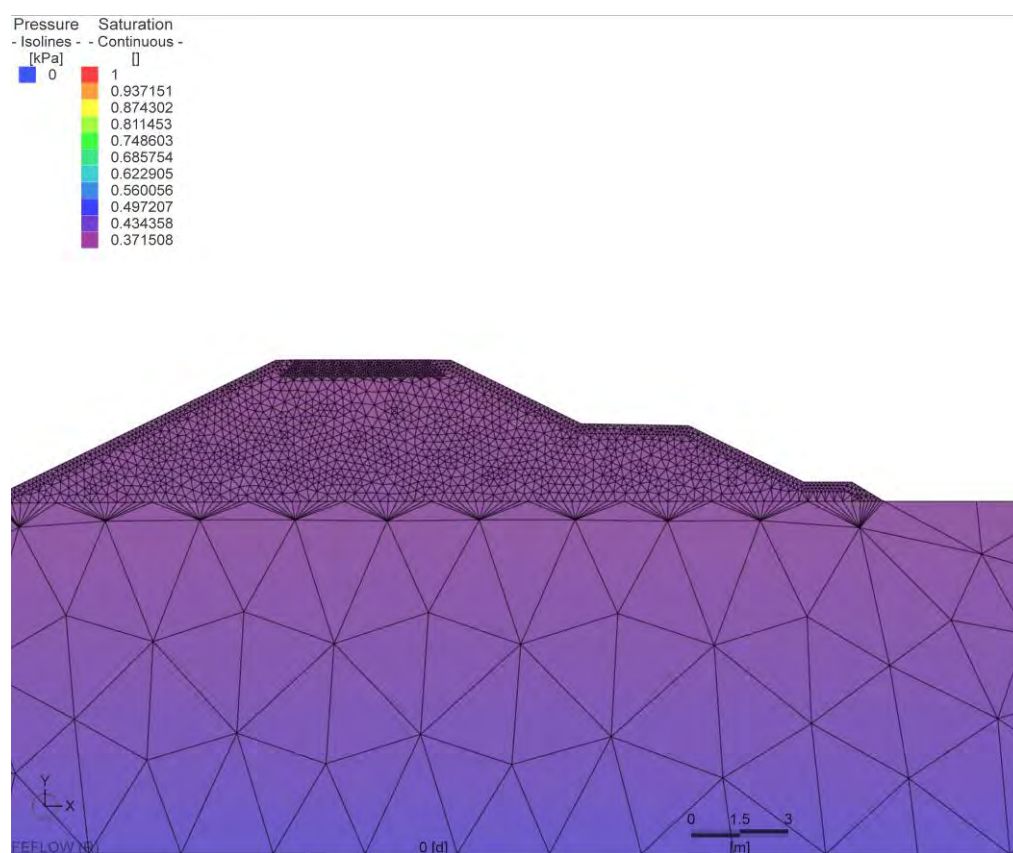


FIGURA 1.17 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 0 GIORNI ALL'INTERNO DELL'ARGINE

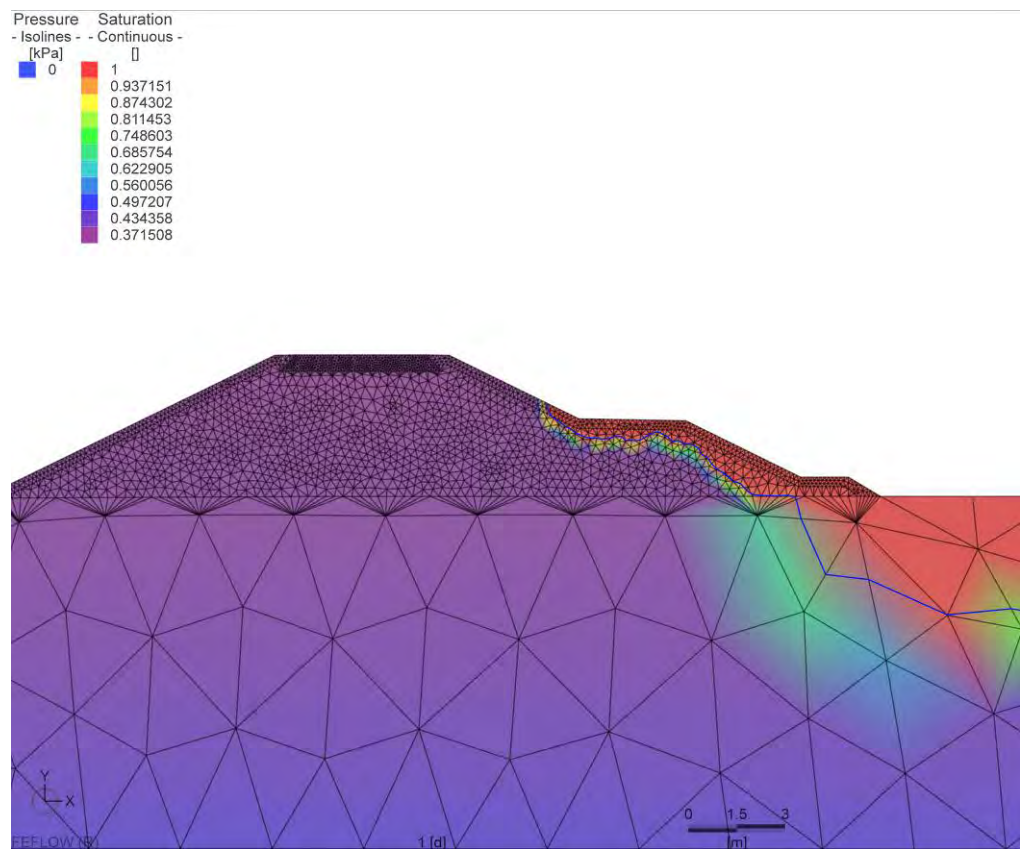


FIGURA 1.18 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 1 GIORNO ALL'INTERNO DELL'ARGINE

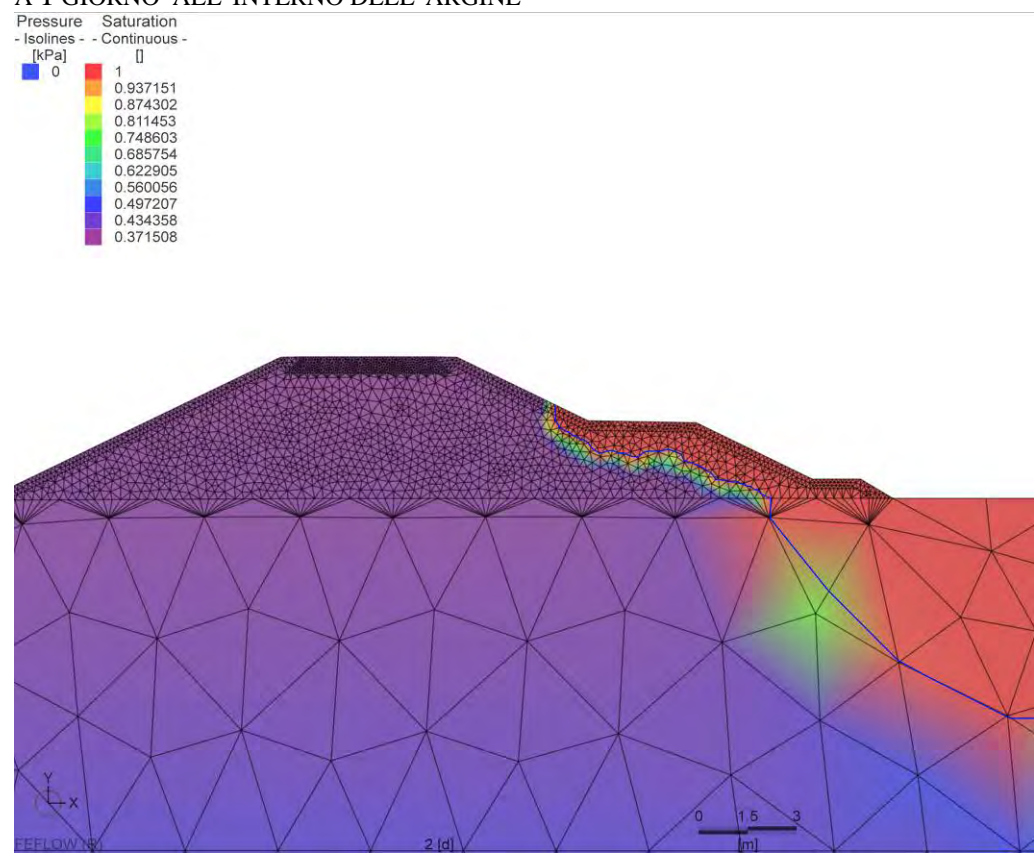


FIGURA 1.19 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 2 GIORNI ALL'INTERNO DELL'ARGINE

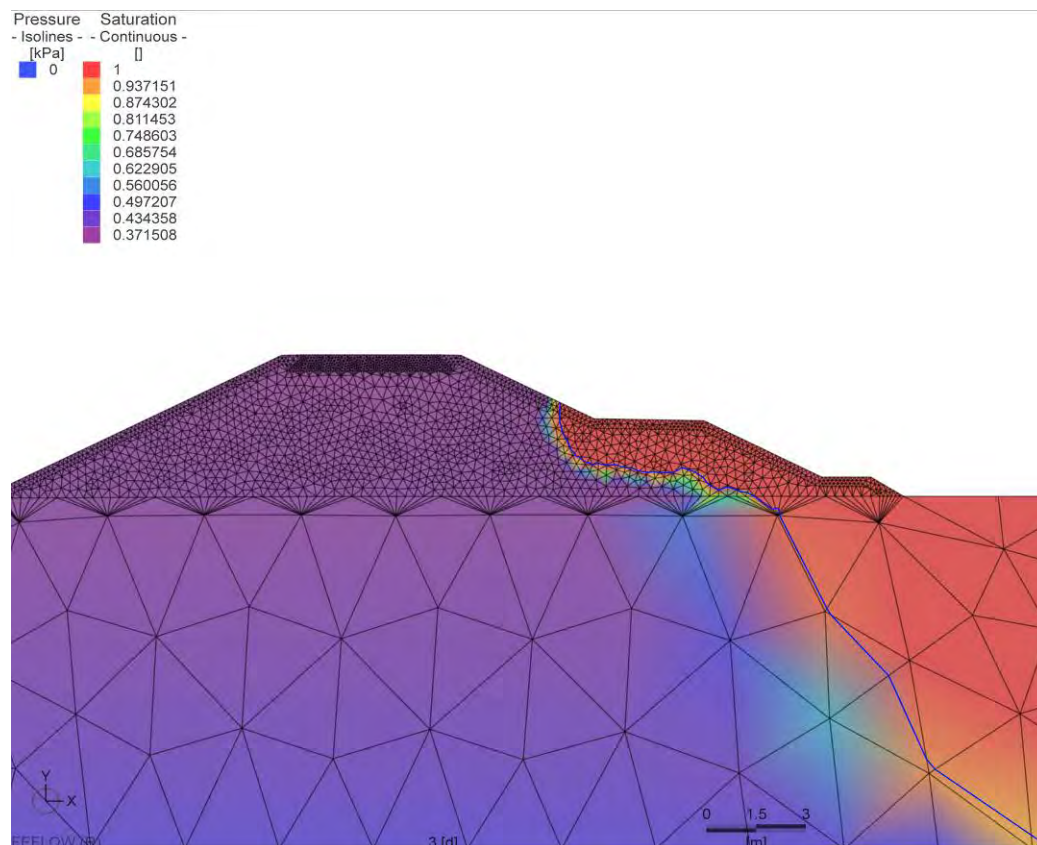


FIGURA 1.20 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 3 GIORNI ALL'INTERNO DELL'ARGINE

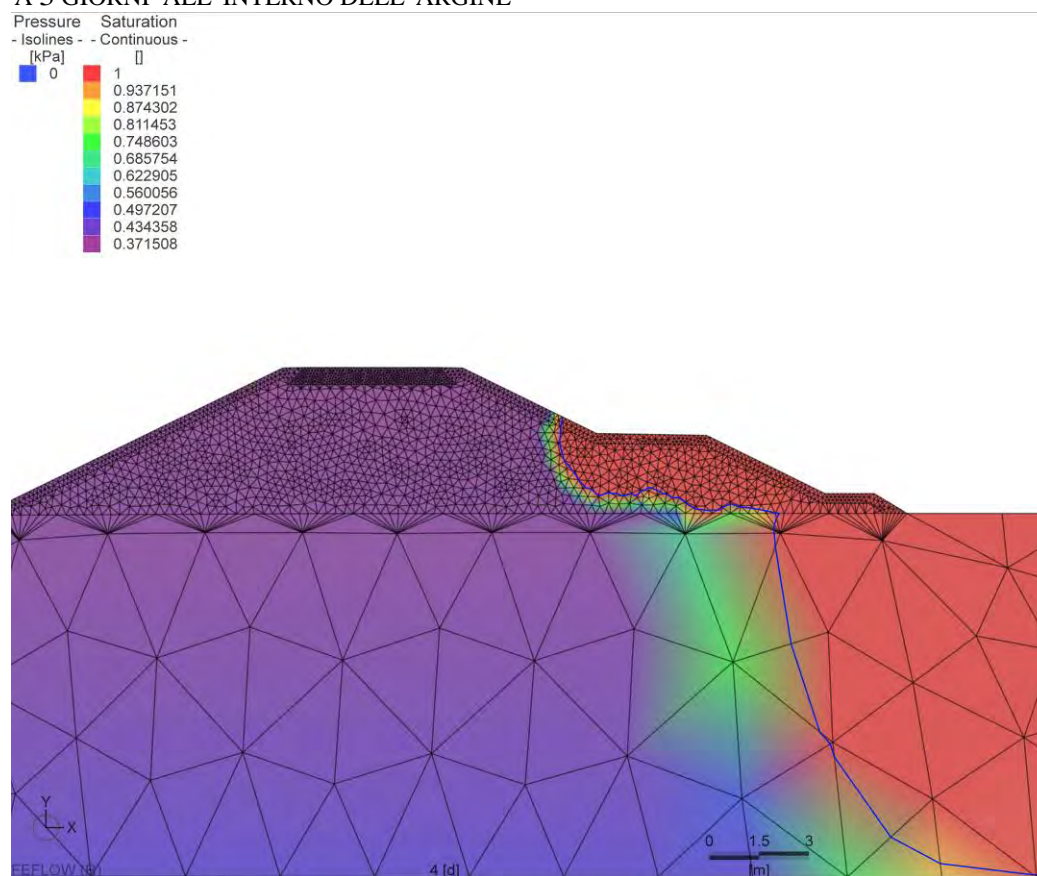


FIGURA 1.21 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 4 GIORNI ALL'INTERNO DELL'ARGINE

Di seguito, dalla Figura 1.22 alla Figura 1.26, è riportata la distribuzione del carico idraulico totale calcolata ogni 0.5 giorni dall'istante iniziale ad un tempo pari a 4 giorni.

Nella condizione iniziale il carico idraulico totale è pari alla quota della falda indisturbata di -20 da p.c..

Si osserva, con l'avanzare della linea di filtrazione verso il basso, la distribuzione del carico idraulico totale.

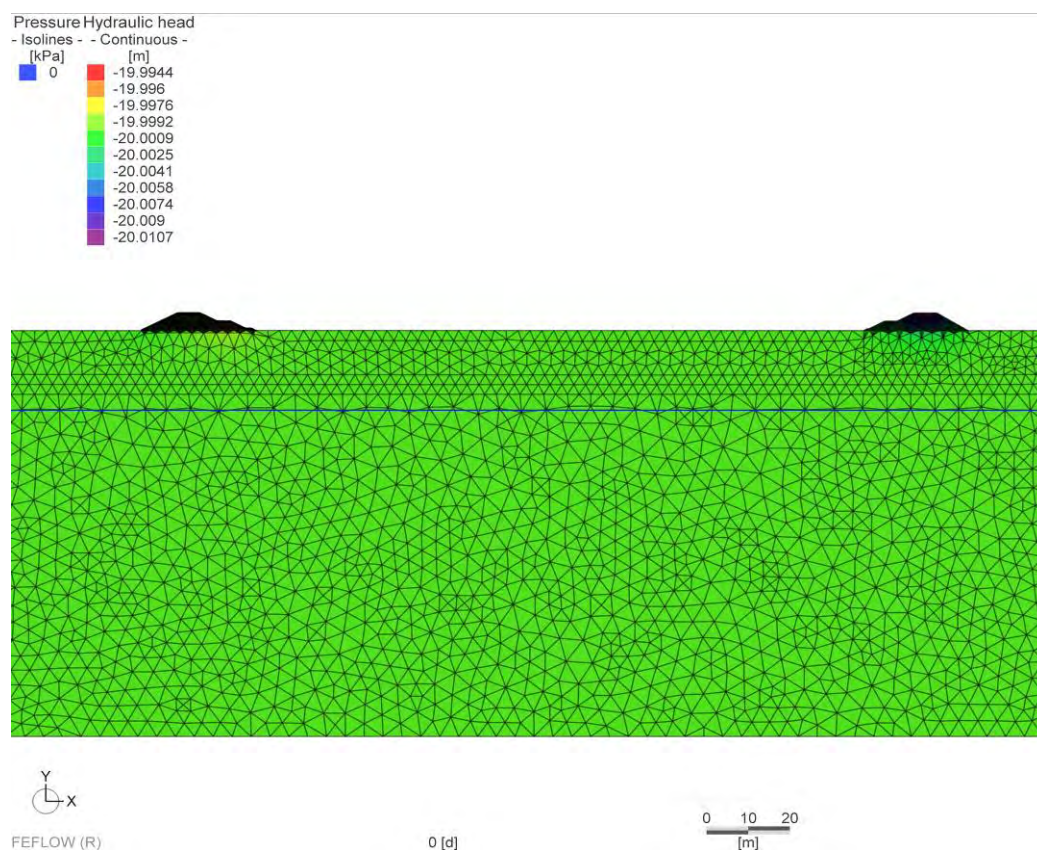


FIGURA 1.22 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL CARICO IDRAULICO TOTALE A 0 GIORNI

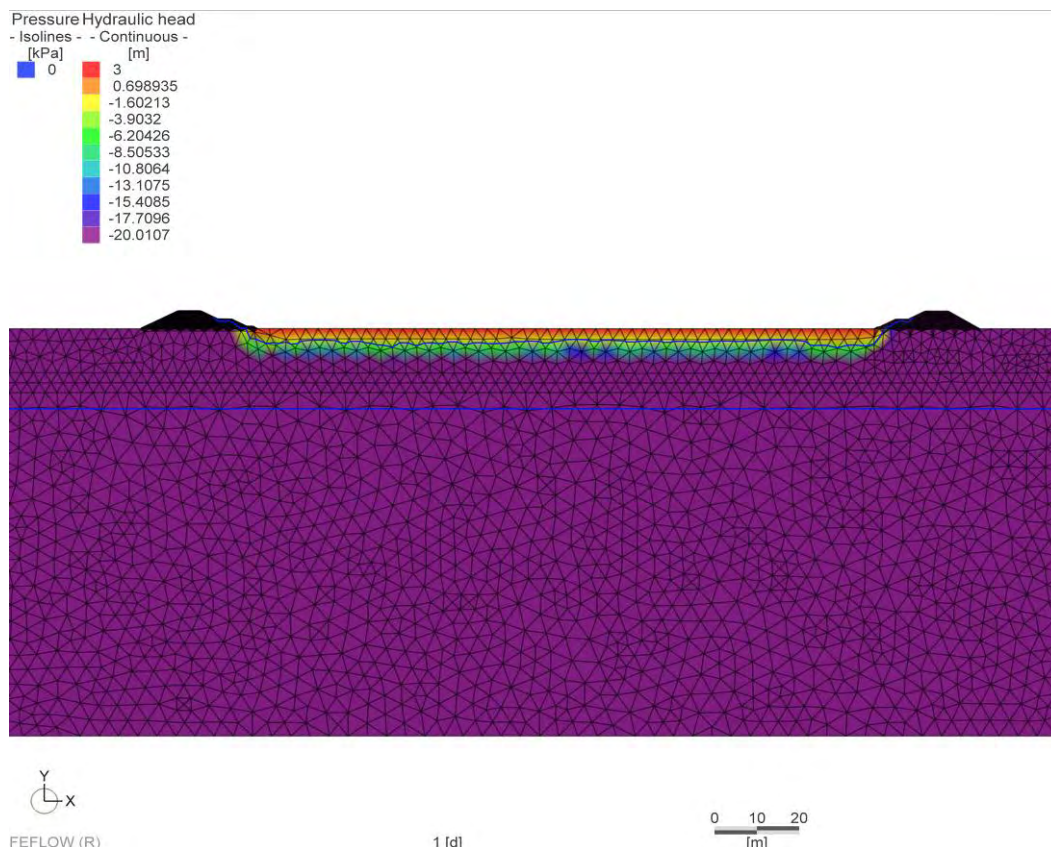


FIGURA 1.23 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL CARICO IDRAULICO TOTALE A 1 GIORNO

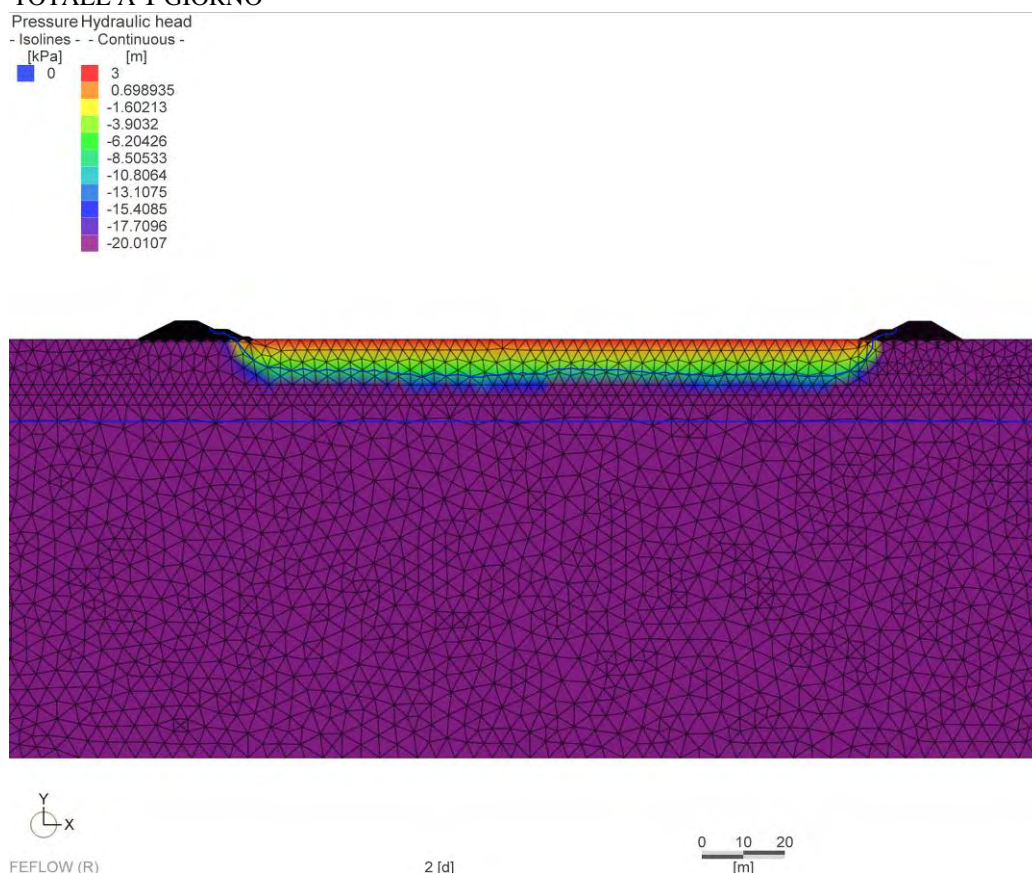


FIGURA 1.24 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL CARICO IDRAULICO TOTALE A 2 GIORNI

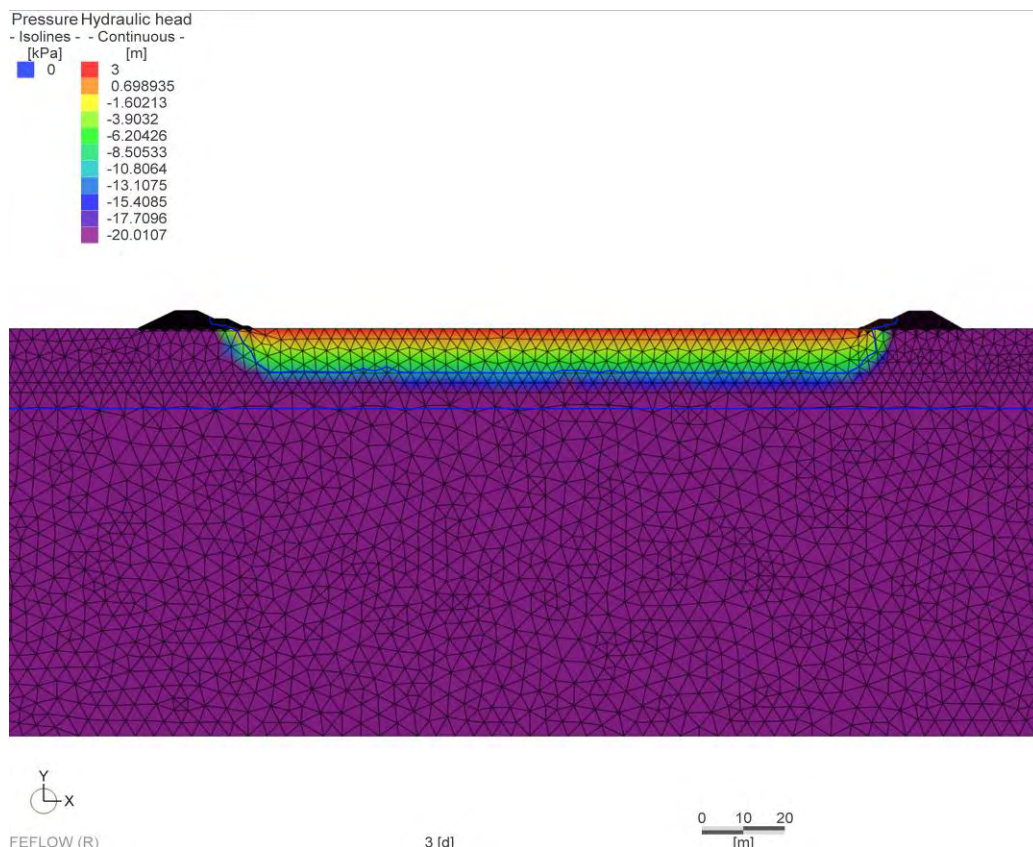


FIGURA 1.25 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL CARICO IDRAULICO TOTALE A 3 GIORNI

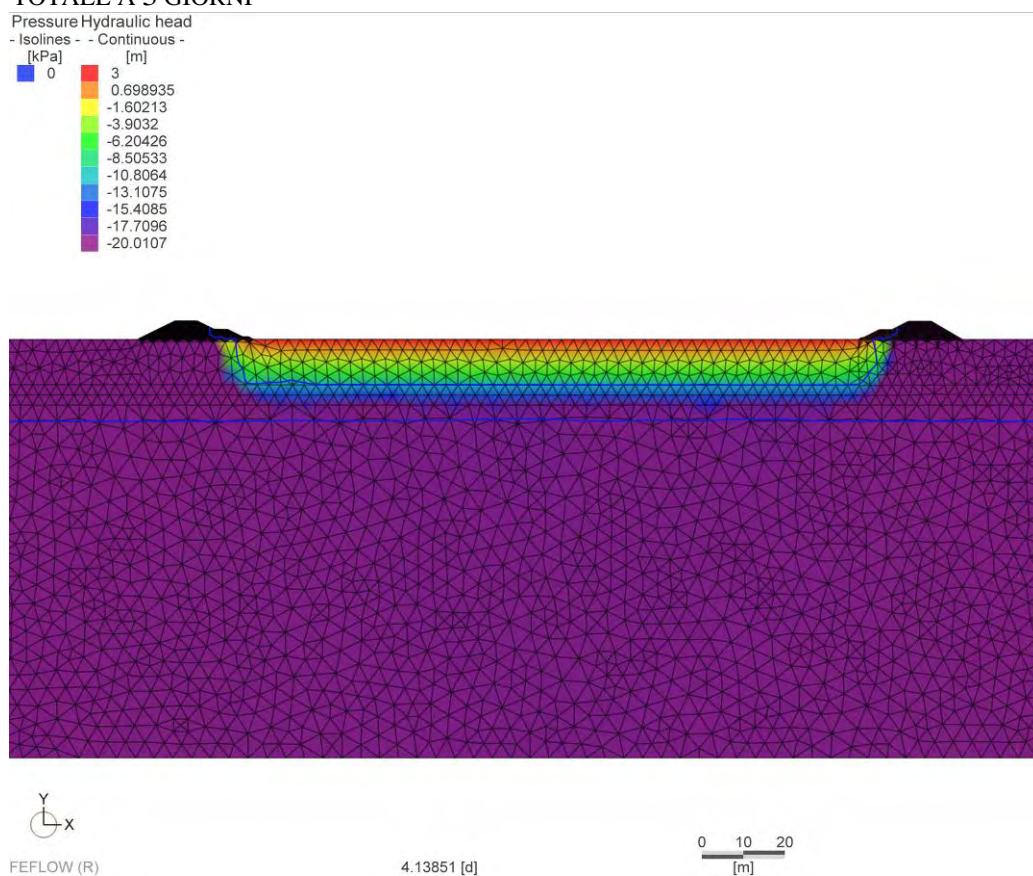


FIGURA 1.26 – SCENARIO N. 1 – DISTRIBUZIONE DEL CARICO IDRAULICO TOTALE A 4 GIORNI

1.2.2. Scenario n. 2

Lo Scenario n. 2 si differenzia dallo Scenario n. 1 unicamente per il valore della condizione al contorno del livello di falda indisturbata, assunta a – 5 m dal p.c..

Tale valore, come già anticipato, è stato assunto in quanto gli acquiferi in oggetto sono tali da poter ipotizzare anche escursioni di livello importanti. Tale condizione costituisce comunque una condizione limite per il caso in oggetto, e comunque ampiamente cautelativa.

In Figura 1.27 e Figura 1.28 è riportata la distribuzione del grado di saturazione in corrispondenza dell'argine, rispettivamente dopo 3 e 10 giorni.

Il limite della zona a totale saturazione, indicata con il colore rosso, si estende in questo caso anche al di sotto dell'argine. Si genera pertanto un flusso anche sotto l'argine, che però, anche ad un tempo $t = 10$ giorni, non raggiunge mai il piede di valle dello stesso, (la linea isobara di valore 0 rimane sempre al di sotto del piano campagna).

All'interno dell'argine, inoltre, la linea di filtrazione non raggiunge mai il paramento di valle anche dopo 10 giorni e in condizione limite di falda a – 5 m dal p.c..

In Figura 1.29 e Figura 1.30 è riportata la distribuzione del carico idraulico totale in corrispondenza dell'argine, rispettivamente dopo 3 e 10 giorni.

Le figure confermano quanto già osservato, evidenziando anche a 10 giorni la parziale saturazione dell'argine.

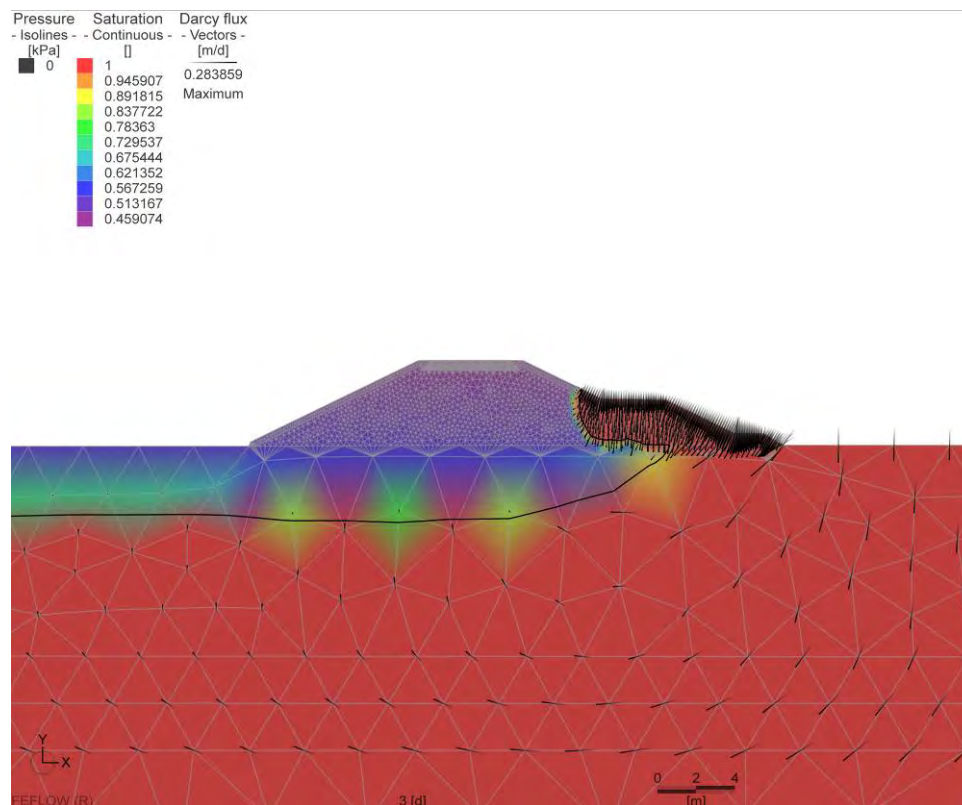


FIGURA 1.27 – SCENARIO N. 2 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 3 GIORNI ALL'INTERNO DELL'ARGINE E DEL CAMPO DI FLUSSO IN TERMINI DI VETTORI VELOCITÀ

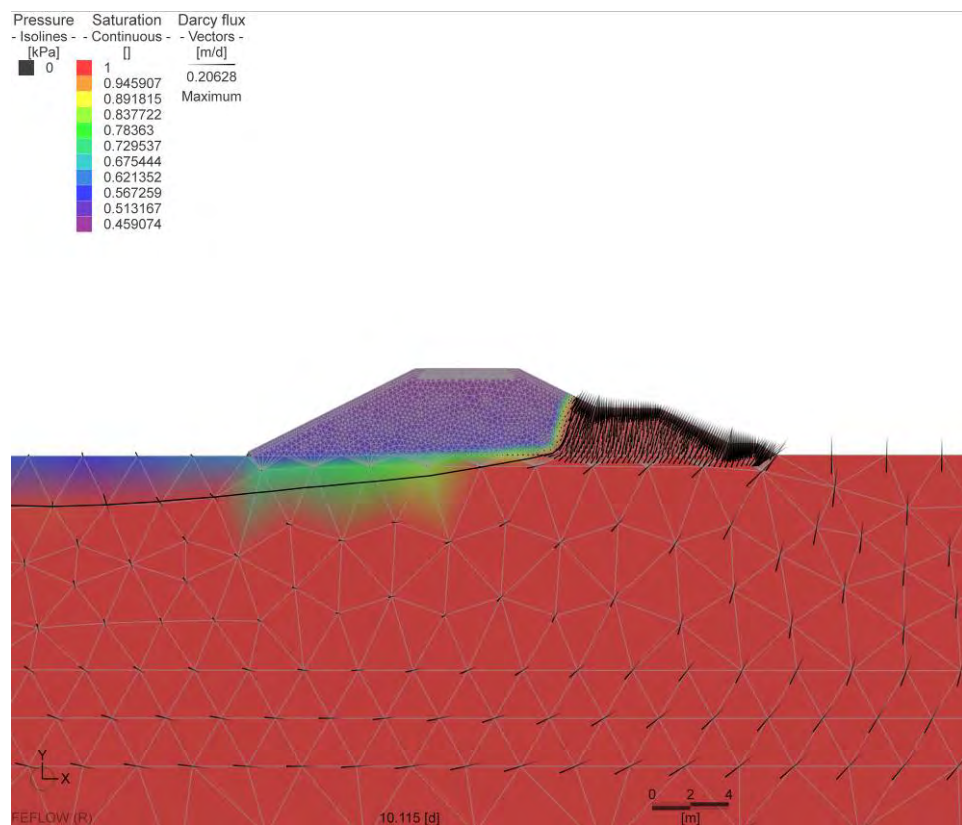


FIGURA 1.28 – SCENARIO N. 2 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 10 GIORNI ALL'INTERNO DELL'ARGINE E DEL CAMPO DI FLUSSO IN TERMINI DI VETTORI VELOCITÀ

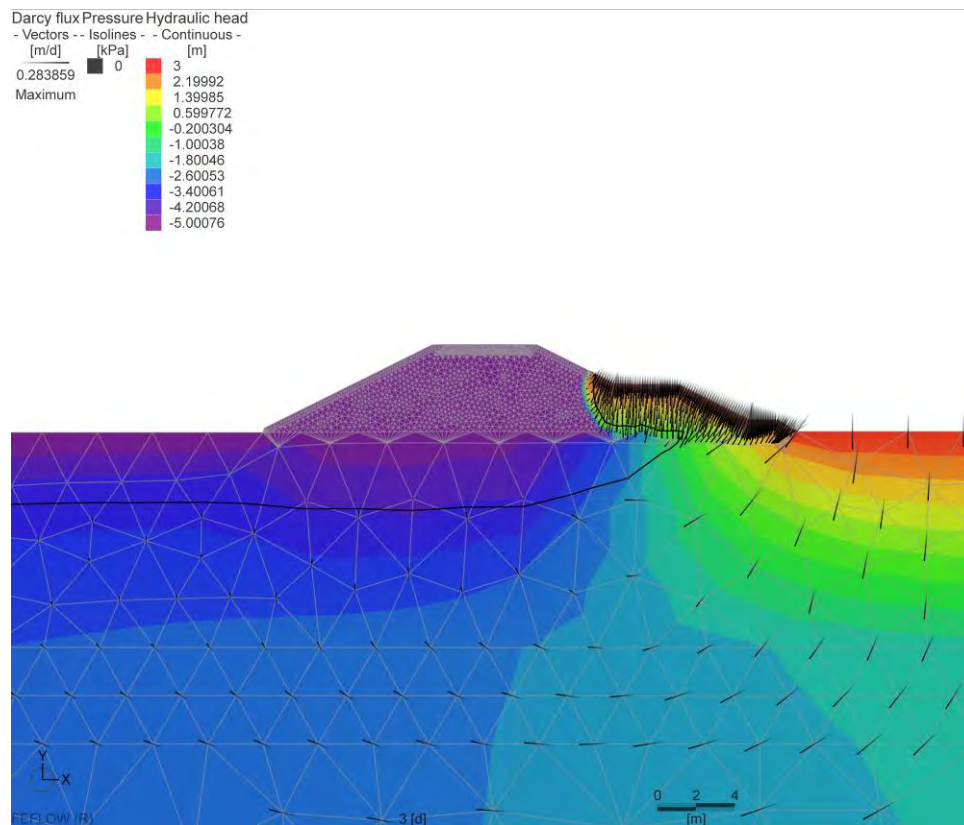


FIGURA 1.29 – SCENARIO N. 2 – DISTRIBUZIONE DEL CARICO IDRAULICO TOTALE A 3 GIORNI ALL'INTERNO DELL'ARGINE E DEL CAMPO DI FLUSSO IN TERMINI DI VETTORI VELOCITÀ

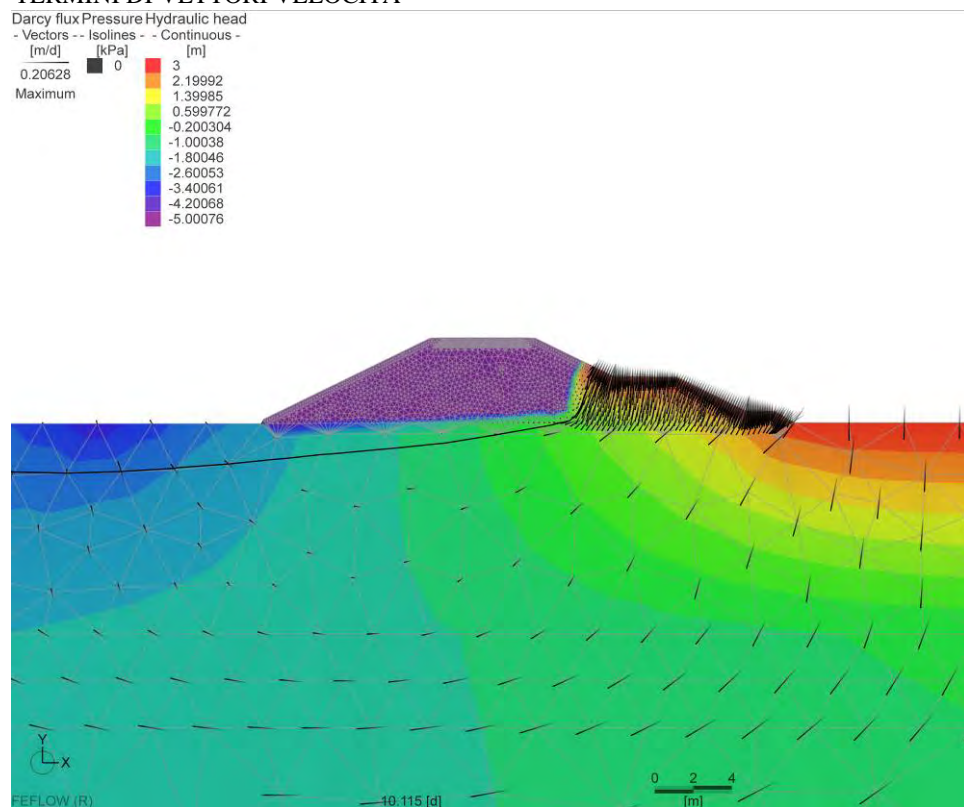


FIGURA 1.30 – SCENARIO N. 2 – DISTRIBUZIONE DEL CARICO IDRAULICO TOTALE A 10 GIORNI ALL'INTERNO DELL'ARGINE E DEL CAMPO DI FLUSSO IN TERMINI DI VETTORI VELOCITÀ

1.2.3. Scenario n. 3

Dopo lo Scenario n. 2, sviluppato su una condizione limite del livello di falda indisturbata, lo Scenario n. 3 presenta una condizione ancor più cautelativa.

L'analisi è condotta in favore di sicurezza, in quanto il fondo del modello è definito come impermeabile, per cui il carico idraulico totale di monte si può dissipare all'interno del solo corpo arginale. Si tratta pertanto della condizione più cautelativa ai fini della stabilità del paramento di valle dell'argine della cassa.

La permeabilità dell'argine è stata assunta pari a 10^{-5} m/s (valore sicuramente cautelativo per un materiale granulare compattato).

L'analisi di calcolo è stata condotta in condizioni transitorie di durata 3 giorni (periodo massimo di riempimento della cassa di espansione).

Geometria del modello

Il modello bidimensionale prevede la schematizzazione del solo corpo arginale costituito da terreno a matrice sabbiosa derivante dagli scavi e compattato; ad esso è stata assegnata, come sopra descritto, una permeabilità di 10^{-5} m/s.

Condizioni al contorno

Nel caso in esame, il modello matematico utilizzato necessita delle seguenti condizioni al contorno:

- Condizione di carico (di I tipo) detta di *seepage* lungo la scarpata esterna dell'argine: la pressione è pari a quella atmosferica (l'altezza piezometrica h è pari alla quota geometrica z). A tale condizione è associata una “*constrain condition*”, ossia un vincolo che consente l'instaurarsi di una portata uscente ma non entrante;
- condizione di carico (di I tipo), in corrispondenza della scarpata interna dell'argine, pari al livello massimo di riempimento della cassa di espansione (+ 3 m dal piede dell'argine).

Le condizioni al contorno assegnate ai materiali sono:

- permeabilità del terreno costituente l'argine: $K=10^{-6}$ m/s;
- coefficiente di immagazzinamento specifico del terreno (*specific storage*), assunto pari a 10^{-4} m⁻¹ in funzione della tipologia di terreno adottata;
- curva di ritenzione del terreno secondo il modello parametrico di Van Genuchten (Figura 1.6).

Fase di output – risultati ottenuti

L'analisi di filtrazione condotta in regime transitorio, ha fornito i risultati riportati da Figura 1.31 a Figura 1.35.

Da Figura 1.31 a Figura 1.33 è riportata la distribuzione del grado di saturazione all'interno del corpo arginale dopo 1, 2 e 3 giorni: neppure in questo caso la linea di filtrazione raggiunge il paramento di valle dell'argine.

Nella Figura 1.34 è riportato il campo di flusso a 3 giorni all'interno dell'argine: è evidente la zona del corpo arginale interessata dal flusso, che non raggiunge il paramento di valle.

La Figura 1.35 raffigura la distribuzione del carico idraulico totale sempre all'interno dell'argine dopo 3 giorni e conferma quanto già dimostrato dalle precedenti immagini.

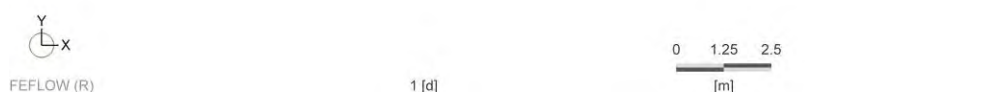
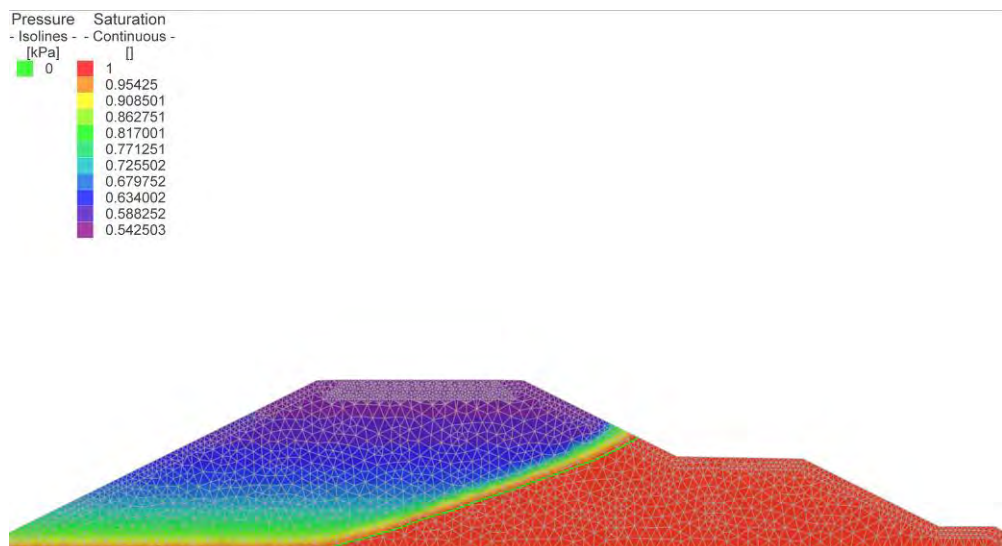


FIGURA 1.31 – SCENARIO N. 3 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 1 GIORNO ALL'INTERNO DELL'ARGINE

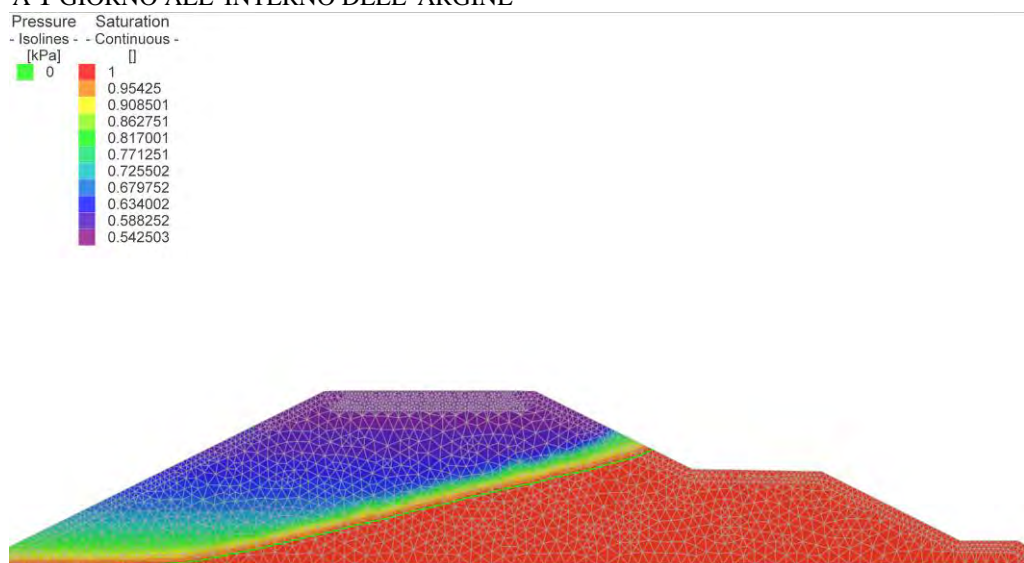
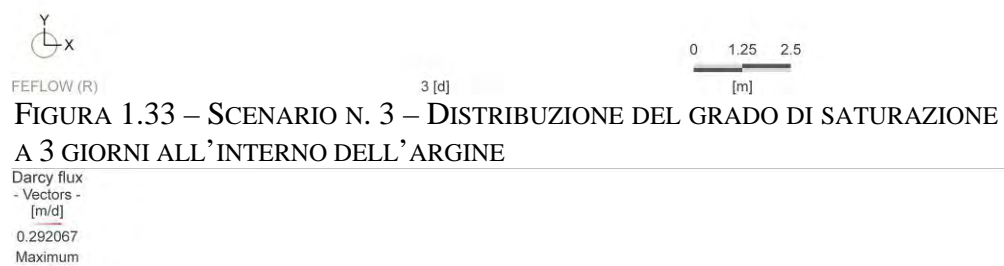
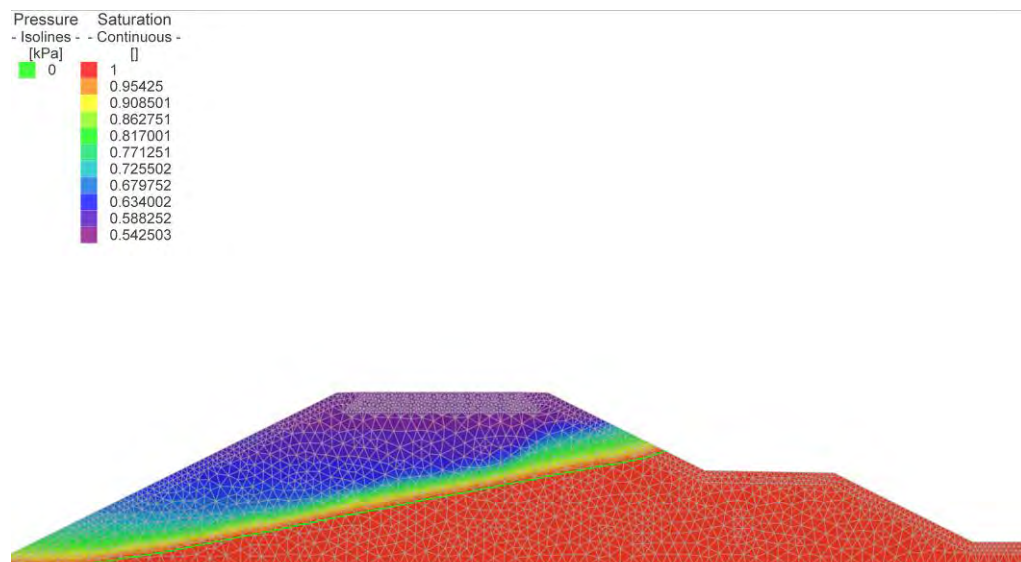


FIGURA 1.32 – SCENARIO N. 3 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 2 GIORNI ALL'INTERNO DELL'ARGINE



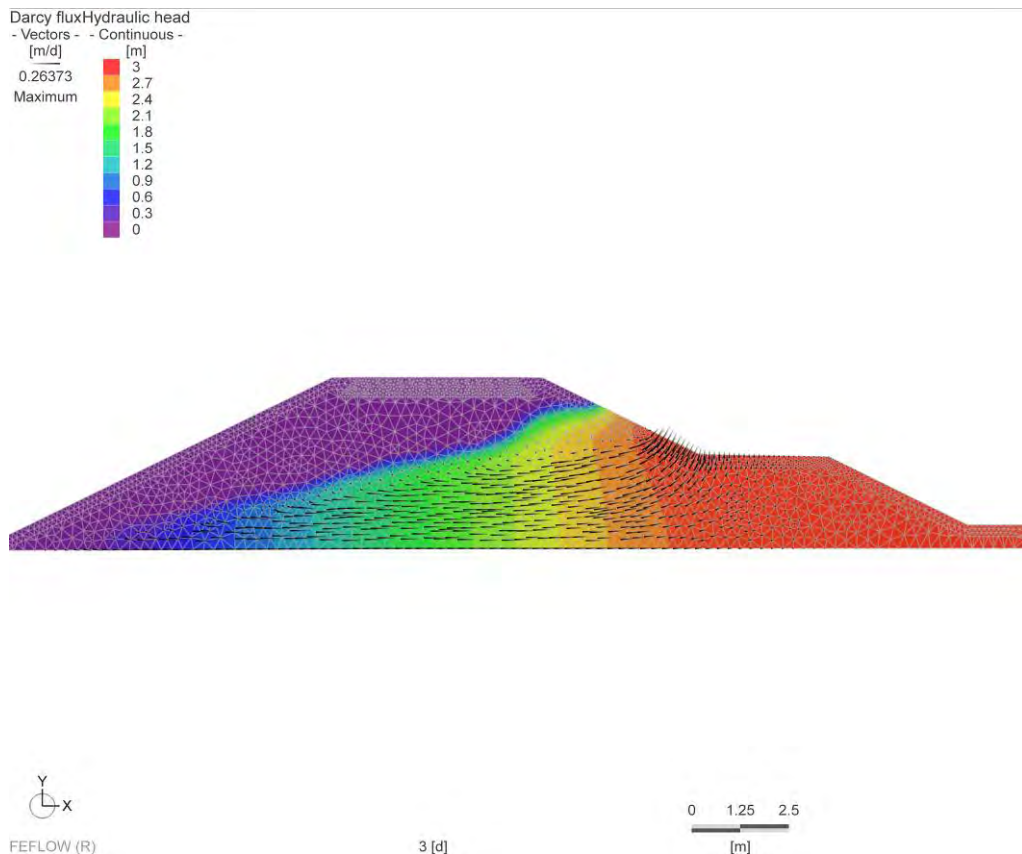


FIGURA 1.35 – SCENARIO N. 3 – DISTRIBUZIONE DEL CARICO IDRAULICO TOTALE A 3 GIORNI ALL'INTERNO DELL'ARGINE

1.2.4. Scenario n. 4

Il modello bidimensionale prevede in questo caso la schematizzazione del solo corpo arginale costituito da terreno a matrice sabbiosa derivante dagli scavi e compattato; ad esso è stata assegnata una permeabilità di 10^{-6} m/s. Questo modello, pertanto, si differenzia dal precedente unicamente per il valore della permeabilità del materiale costituente l'argine, assunto pari a 10^{-6} m/s.

Rispetto allo scenario precedente, la minore permeabilità del terreno induce un avanzamento più lento della linea di filtrazione attraverso il corpo arginale.

Fase di output – risultati ottenuti

L'analisi di filtrazione condotta in regime transitorio, ha fornito i risultati riportati da Figura 1.36 a Figura 1.38.

Nella Figura 1.36 è riportata la distribuzione del grado di saturazione all'interno del corpo arginale dopo 3 giorni: la linea di filtrazione risulta arretrata rispetto al caso precedente e anche in questo caso non raggiunge il paramento esterno dell'argine.

Nella Figura 1.37 è riportato il campo di flusso a 3 giorni all'interno dell'argine: è evidente la zona del corpo arginale interessata dal flusso, che non raggiunge il paramento di valle.

La Figura 1.38 raffigura la distribuzione del carico idraulico totale sempre all'interno dell'argine dopo 3 giorni e conferma quanto già dimostrato dalle precedenti immagini.

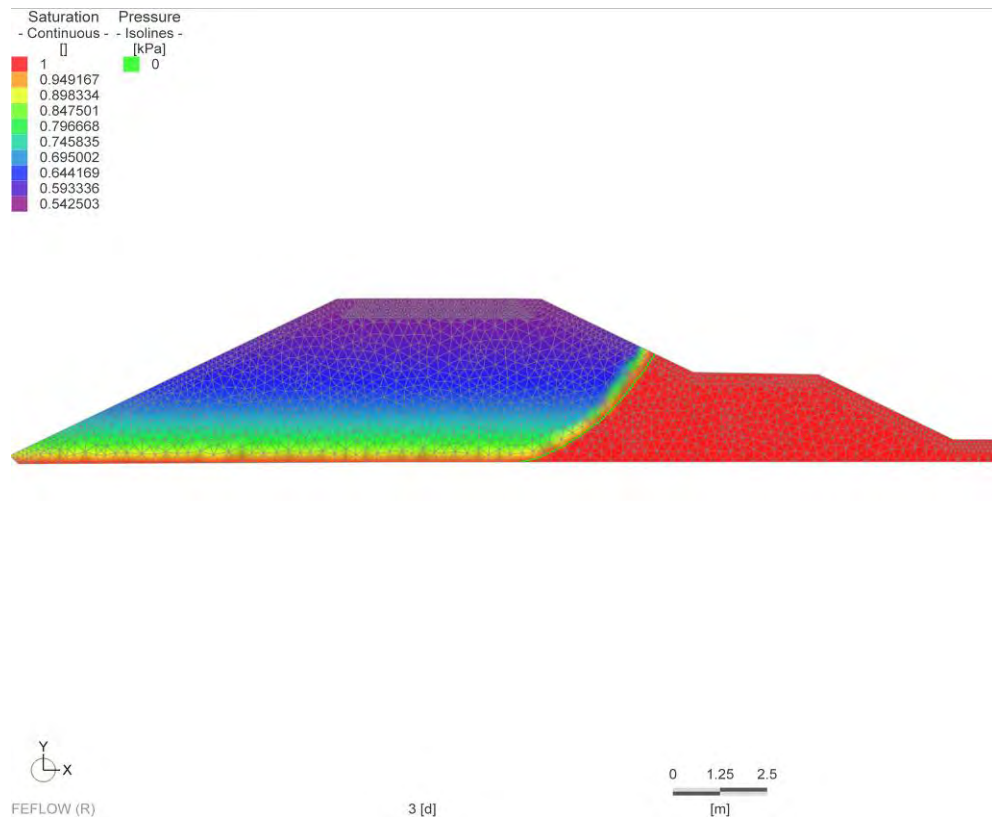


FIGURA 1.36 – SCENARIO N. 4 – DISTRIBUZIONE DEL GRADO DI SATURAZIONE A 3 GIORNI ALL'INTERNO DELL'ARGINE

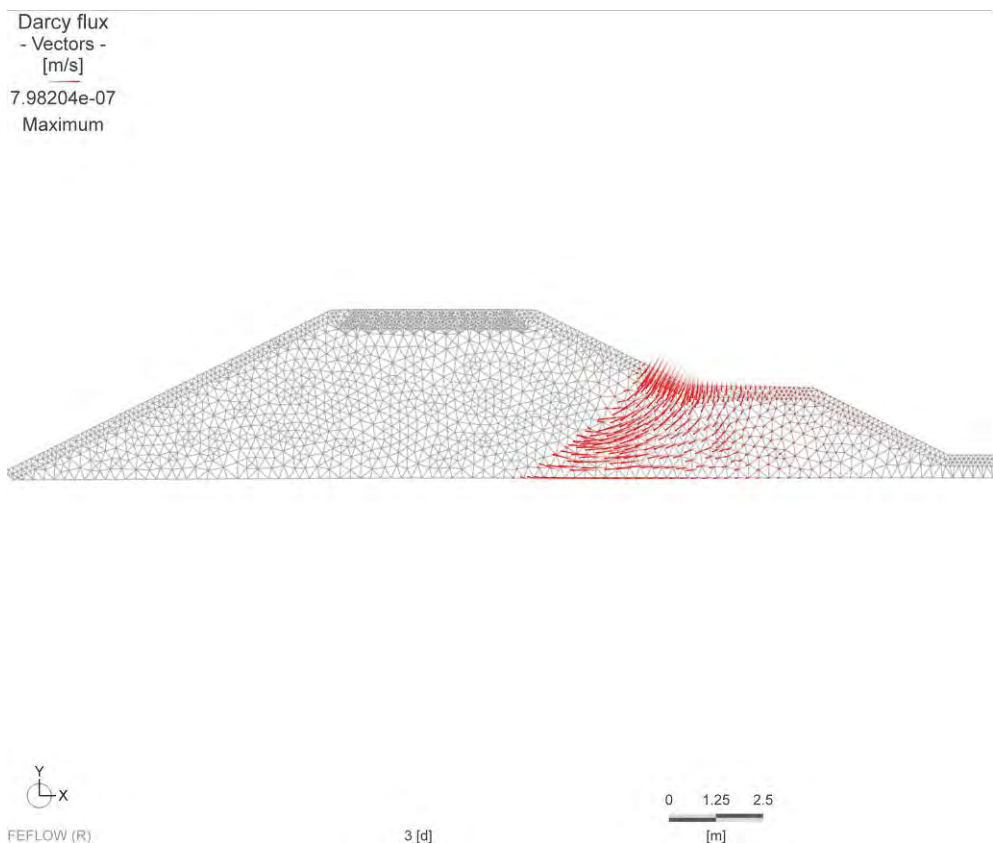


FIGURA 1.37 – SCENARIO N. 4 – CAMPO DI FLUSSO A 3 GIORNI ALL'INTERNO DELL'ARGINE

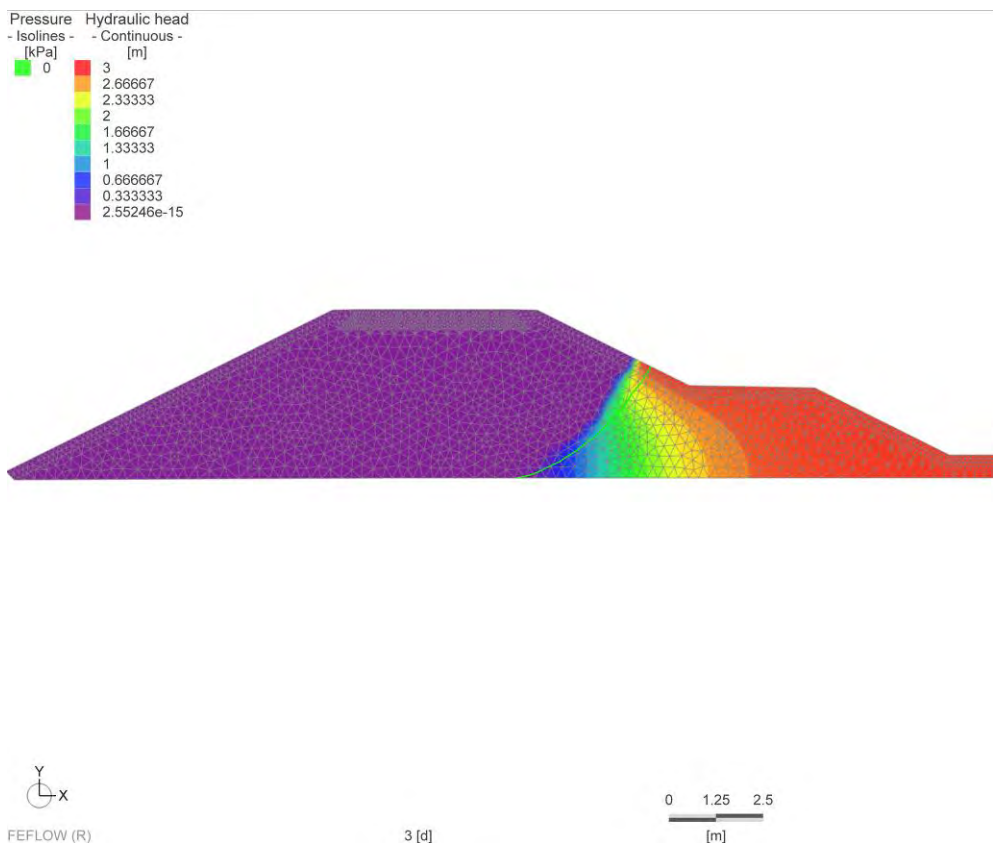


FIGURA 1.38 – SCENARIO N. 4 – DISTRIBUZIONE DEL CARICO IDRAULICO TOTALE A 3 GIORNI ALL'INTERNO DELL'ARGINE

1.3. Conclusioni

Ai fini dell'analisi di filtrazione attraverso l'argine di contenimento delle casse di espansione del fiume Olona, si è sviluppato un modello matematico di calcolo bidimensionale ad elementi finiti.

Lo scopo è stato quello di determinare il flusso di filtrazione attraverso l'argine della cassa di espansione, in condizioni di terreno parzialmente saturo e di completo riempimento della cassa di espansione.

Si è eseguita, quindi per il caso di studio, la modellazione dell'intera cassa di espansione (e di una porzione di territorio, su ciascun lato della cassa, pari a circa 2.5 volte la larghezza della cassa stessa) e del terreno sottostante fino ad una profondità di circa 100 m.

In tale configurazione, si è analizzato il flusso di filtrazione attraverso sia il corpo arginale che la fascia di terreno insatura presente sotto la cassa tra quota 0 e quota - 20 da piano campagna (livello della falda indisturbata).

Si è ottenuto che ad un tempo t pari ad almeno 3 giorni (periodo massimo di riempimento della cassa) il flusso di filtrazione non solo non interessa il paramento di valle dell'argine, ma non interferisce neppure con l'acquifero indisturbato sotto la cassa.

Si è inoltre effettuata la stessa analisi di flusso considerando cautelativamente un livello di falda pari a -5.

Anche in questo caso, ad un tempo t pari a 3 giorni, il flusso di filtrazione non va ad interessare il paramento di valle dell'argine.

Risultando soddisfatte le verifiche descritte, si è poi ipotizzato che la differenza di carico idraulico totale monte - valle si possa dissipare all'interno del solo corpo arginale. Si tratta della condizione più gravosa, sotto l'ipotesi di terreno di fondazione dell'argine impermeabile.

Anche in questo caso, sia assumendo una permeabilità dell'argine pari a 10^{-5} m/s, che 10^{-6} m/s, ad un tempo $t = 3$ giorni, il flusso di filtrazione non arriva ad interessare il paramento di valle dell'argine.

Da tutti gli scenari modellati, compresi i più gravosi, emerge quindi come la linea di filtrazione all'interno dell'argine non raggiunga mai il paramento di valle dell'argine stesso, in un transitorio di calcolo di almeno 3 giorni (periodo massimo di riempimento della cassa di espansione).

Nel caso in assoluto più gravoso, rappresentato dallo Scenario n. 3 (modellazione del solo corpo arginale caratterizzato da un terreno con permeabilità 10^{-5} m/s e fondo impermeabile), dopo 3 giorni il flusso che si genera all'interno del corpo arginale non raggiunge la scarpata di valle dell'argine.

Pertanto il paramento di valle dell'argine si trova, in tutti i casi, in condizioni di sicurezza, in relazione a possibili fenomeni di filtrazione.