

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO
NODO DI CATANIA**

U.O. GEOLOGIA TECNICA, DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO

PROGETTO DEFINITIVO

**INTERRAMENTO LINEA PER IL PROLUNGAMENTO DELLA PISTA
DELL'AEROPORTO DI FONTANAROSSA E PER LA MESSA A STI DEL
TRATTO DI LINEA INTERESSATO.**

RELAZIONE MODELLAZIONE IDROGEOLOGICA

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

RS3H 00 D 69 RH GE0002 002 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	Emissione esecutiva	S. Romano	gen. 2020	F.M. Carli	gen. 2020	S. Vanfiori	gen. 2020	M. Comedini	gen. 2020



File: RS3H 00 D69 RH GE0002 002 A.docx

n. Elab.:114

INDICE

1	ANALISI DI FLUSSO	4
2	COMPLESSI IDROGEOLOGICI.....	5
2.1	STRUTTURE IDROGEOLOGICHE E FALDE ACQUIFERE	5
2.2	COMPLESSI IDROGEOLOGICI	6
2.2.1	<i>Complessi delle unità del substrato.....</i>	<i>6</i>
2.2.2	<i>Complessi dei depositi di copertura</i>	<i>8</i>
2.3	CONDIZIONI DI DEFLUSSO IDRICO SOTTERRANEO	11
3	ANALISI NUMERICHE	15
3.1	IMPOSTAZIONE DEL PROBLEMA	15
3.2	CODICE DI CALCOLO UTILIZZATO	17
3.3	DESCRIZIONE DELLE ANALISI	17
3.4	PARAMETRI IDROGEOLOGICI DI INGRESSO	19
4	RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE	20
4.1	SEZIONE 1.....	20
4.1.1	<i>Flusso nella condizione iniziale</i>	<i>21</i>
4.1.2	<i>Flusso dopo la realizzazione dell'opera.....</i>	<i>26</i>
4.2	SEZIONE 2.....	32
4.2.1	<i>Flusso nella condizione iniziale</i>	<i>32</i>
4.2.2	<i>Flusso dopo la realizzazione dell'opera.....</i>	<i>38</i>
4.2.3	<i>Flusso con la realizzazione del by-pass.....</i>	<i>44</i>
4.3	SEZIONE 3.....	50
4.3.1	<i>Flusso nella condizione iniziale</i>	<i>50</i>
4.3.2	<i>Flusso dopo la realizzazione dell'opera.....</i>	<i>56</i>
4.3.3	<i>Flusso con la realizzazione del by-pass.....</i>	<i>62</i>
5	CONCLUSIONI	69



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO
NODO DI CATANIA

INTERRAMENTO LINEA PER IL PROLUNGAMENTO DELLA
PISTA DELL'AEROPORTO DI FONTANAROSSA E PER LA MESSA
A STI DEL TRATTO DI LINEA INTERESSATO.

RELAZIONE MODELLAZIONE IDROGEOLOGICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3H	00	D69RH	GE 00 02 002	A	3 di 70

6	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	70
---	--------------------------------	----

1 ANALISI DI FLUSSO

Nell'ambito dello studio Geologico per il Progetto Definitivo dell' *"Interramento linea per il prolungamento della pista dell'aeroporto di Fontanarossa e per la messa a sti del tratto di linea interessato"* sono state effettuate analisi ed approfondimenti specialistici a carattere idrogeologico. Tali approfondimenti integrano/completano lo studio geologico generale e sono finalizzati, in particolare, alla definizione degli impatti indotti dall'inserimento dell'opera in progetto sulla circolazione idrica delle acque di falda nel sottosuolo dell'area di intervento. Per tale motivo, gli studi sono stati effettuati tramite la ricostruzione del modello idrogeologico di riferimento e l'implementazione di un modello numerico di flusso delle acque sotterranee contenente una ricostruzione dettagliata dell'opera in progetto.

In particolare, lo studio specialistico è stato condotto secondo le seguenti fasi:

- acquisizione ed analisi degli studi idrogeologici esistenti riguardanti l'area di interesse;
- ricerca dati bibliografici inerenti le caratteristiche idrogeologiche dei settori di studio;
- analisi critica delle indagini geognostiche disponibili;
- analisi critica dell'intero set di monitoraggi piezometrici disponibili;
- ricostruzione di n.3 sezioni geologiche ed idrogeologiche nei settori di territorio potenzialmente più interessanti dal punto di vista dell'interferenza tra opere in progetto e copi idrici sotterranei;
- modellazione analitica del flusso sotterraneo mediante codice di calcolo numerico agli elementi finiti PLAXIS 2D versione 8.6;
- analisi dei dati e redazione delle presenti note di sintesi e degli elaborati cartografici a corredo.

2 COMPLESSI IDROGEOLOGICI

Nel seguito si riporta una sintesi delle caratteristiche idrogeologiche dell'area di studio, corrispondente alla porzione nord-orientale della Piana di Catania. Per una trattazione completa degli aspetti generali e di tutte le caratteristiche idrogeologiche del settore di intervento, si rimanda alla Relazione Geologica, Geomorfologica ed Idrogeologica realizzata per il Progetto Definitivo di "Interramento linea per il prolungamento della pista dell'Aeroporto di Fontanarossa" (RS3H 00 D69 RG GE0001 001), di cui il presente documento è parte integrante.

2.1 Strutture idrogeologiche e falde acquifere

La principale struttura idrogeologica dell'area in esame è rappresentata dalla Piana di Catania e dai depositi quaternari che la riempiono (Carbone et al. 2009; Carbone 2011). Tale idrostruttura è caratterizzata, per buona parte del suo sviluppo, dalla presenza di una falda superficiale contenuta all'interno dei depositi alluvionali grossolani del Fiume Simeto (Ferrara 1999; Carbone et al. 2010). L'andamento della superficie piezometrica mostra, molto chiaramente, la presenza di un importante asse di drenaggio disposto parallelamente alla direzione secondo cui sono disposti i depositi alluvionali più permeabili (Ferrara 1999), grossomodo corrispondente all'antico alveo del Fiume Simeto. In prossimità della costa ionica, inoltre, è presente una ulteriore falda profonda semiconfinata, contenuta all'interno dei depositi grossolani che caratterizzano tale settore (Carbone et al. 2010).

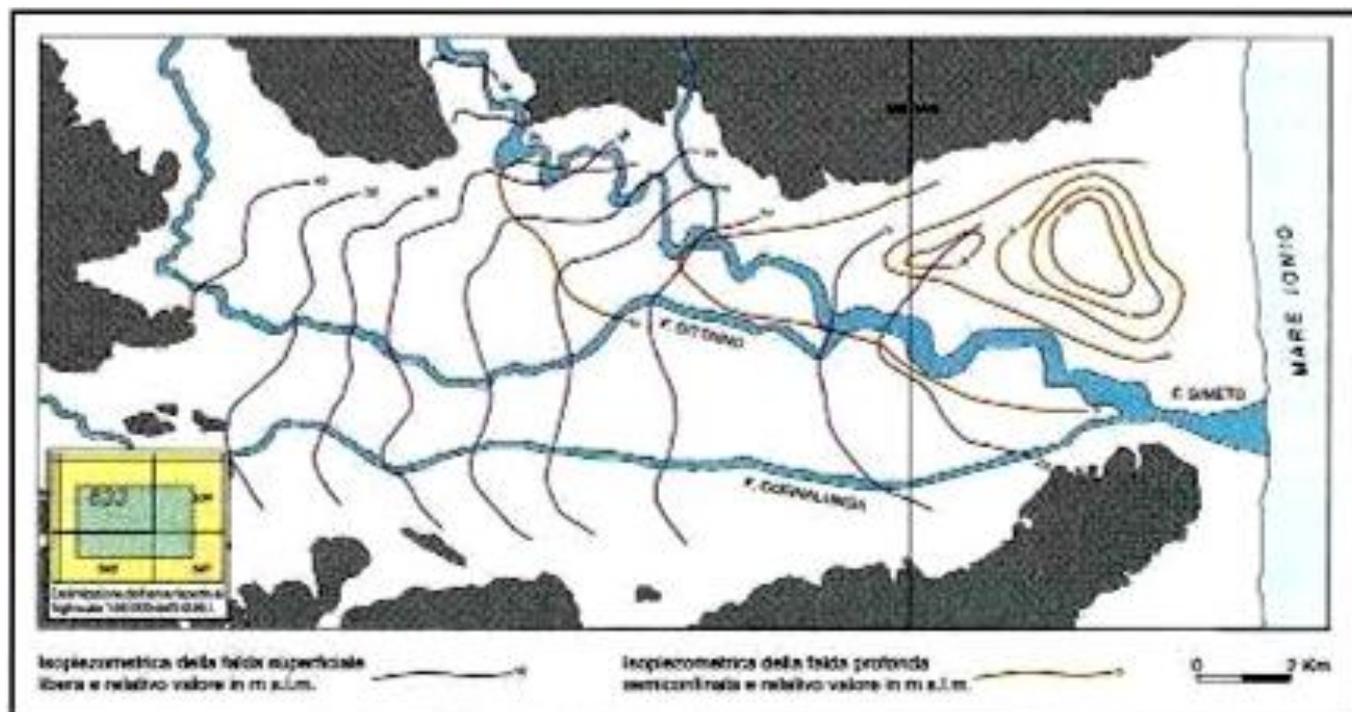


Figura 1 – Andamento delle superfici piezometriche relative alle falde idriche presenti nella Piana di Catania (da Ferrara 1999, modificato).

Gli acquiferi che contengono le suddette falde, come evidenziato dalle campagne di indagini geognostiche condotte, sono costituiti prevalentemente da depositi alluvionali grossolani, attuali e recenti, e da sabbie e ghiaie di ambiente continentale e di transizione, spesso formanti superfici terrazzate disposte su vari ordini (Ferrara 1999;

Carbone et al. 2009). La falda dell'acquifero alluvionale si posiziona ad una profondità variabile tra 2 e 30 m dall'attuale p.c., mostrando quindi una forte disomogeneità probabilmente connessa alle importanti variazioni granulometriche, sedimentologiche e idrogeologiche dei depositi terrigeni costituenti l'acquifero (Ferrara 1999).

La ricostruzione morfologica dell'andamento del substrato argilloso al di sotto dei depositi grossolani mostra chiaramente un andamento molto articolato del tetto delle argille pleistoceniche, dal quale sono comunque riconoscibili i principali assi di drenaggio orientati circa E-W (Carbone et al. 2009, 2010). La ricostruzione dello spessore dell'acquifero presente nel sottosuolo della Piana di Catania, invece, evidenzia il graduale aumento di potenza che si ha muovendosi verso il depocentro della piana, fino ad un massimo di circa 80 m (Carbone et al. 2009). Ciò è dovuto, naturalmente, alla presenza nel sottosuolo di importanti spessori di terreni prevalentemente sabbioso-ghiaiosi.

L'alimentazione dell'acquifero sotterraneo deriva, in buona sostanza, dagli apporti idrici, sia superficiali che sotterranei, provenienti dalle depressioni vallive incise dai principali corsi d'acqua presenti nell'area (Ferrara 1999), come quelle dei Fiumi Simeto e Gornalunga. In particolare, il Fiume Simeto riceve nei settori di monte l'ulteriore apporto dei deflussi sotterranei derivanti dal versante occidentale del Monte Etna (Ferrara et al. 1998; Ferrara & Pappalardo 2004; Carbone et al. 2009). Ulteriori apporti si hanno inoltre con l'acquifero presente lungo il margine settentrionale della pianura, costituito dai depositi sabbioso-ghiaiosi continentali e marini delle colline settentrionali (Ferrara 1975; Carbone et al. 2009).

2.2 Complessi idrogeologici

Nei settori di intervento sono stati individuati sette complessi idrogeologici, distinti sulla base delle differenti caratteristiche di permeabilità e del tipo di circolazione idrica che li caratterizza. Di seguito vengono descritti i caratteri peculiari dei diversi complessi individuati, seguendo uno schema basato sull'assetto geologico e litostratigrafico dell'area di intervento.

Nello specifico, la definizione delle caratteristiche idrogeologiche dei vari complessi presenti nell'area è stata compiuta in considerazione delle numerose prove di permeabilità (Lefranc) realizzate nei fori di sondaggio nel corso delle diverse campagne di indagine. Si sottolinea che la stima del *range* di variazione del coefficiente di permeabilità relativo ad ogni complesso idrogeologico è stata effettuata in funzione delle caratteristiche sedimentologiche e litologiche dei terreni, nonché del grado di alterazione, fessurazione e carsismo dei singoli ammassi rocciosi.

2.2.1 Complessi delle unità del substrato

Questo gruppo è rappresentato da due distinti complessi idrogeologici, costituiti da successioni sedimentarie tardo-cenozoiche di ambiente continentale, marino e transizionale.

2.2.1.1 Substrato argilloso-limoso

Al presente complesso (**SAL**) sono associati i depositi prevalentemente pelitici dell'unità **FAG**. Dal punto di vista litologico si tratta di argille limose, limi argillosi e argille limoso-marnose a struttura generalmente indistinta, a tratti con laminazione incrociata e stratificazione sub-parallela; a luoghi si rinvencono lenti e/o livelli di sabbie fini e limi argilloso-sabbiosi in strati da molto sottili a sottili, localmente laminati, con rare ghiaie poligeniche da sub-arrotondate ad arrotondate, più frequenti verso l'alto stratigrafico; talora sono presenti livelli di limi e limi argillosi a struttura laminata o finemente stratificata, con diffusi veli di materiale organico e discontinue intercalazioni lenticolari di tufi gradati.

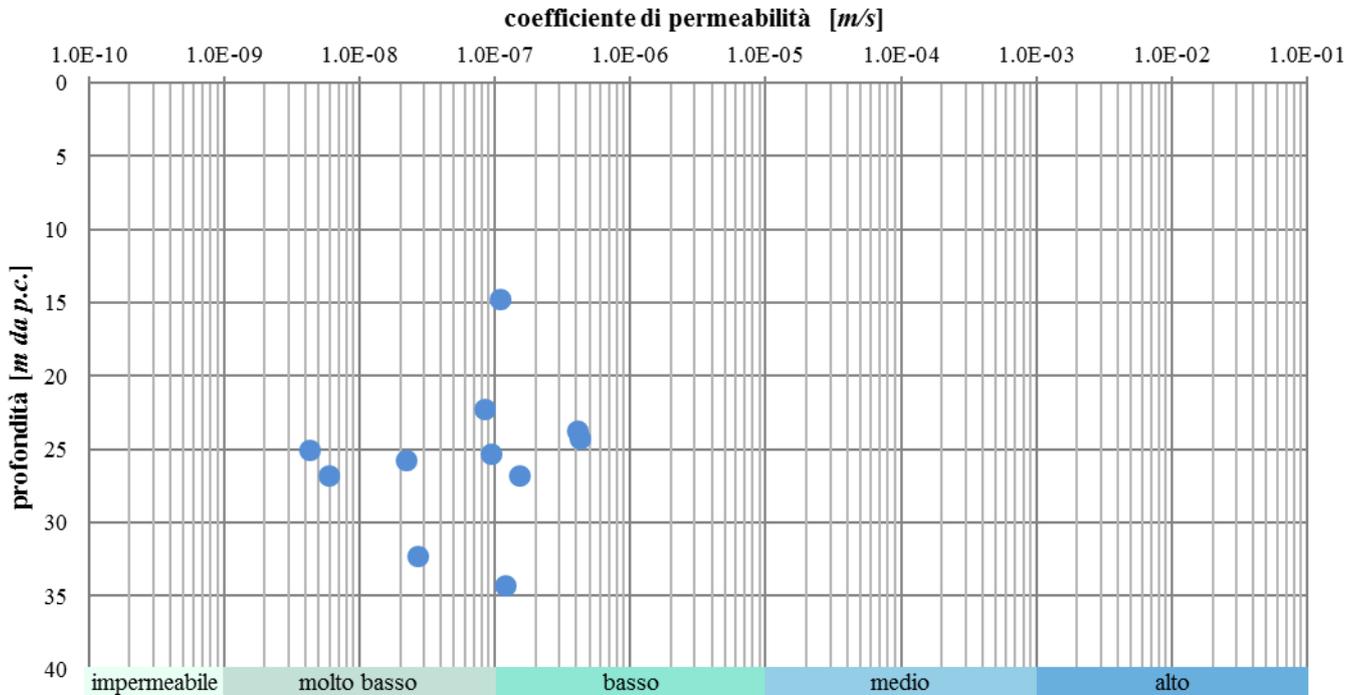


Figura 2 - Grafico di distribuzione del coefficiente di permeabilità in funzione della profondità per il Complesso delle unità del substrato argilloso-limoso (SAL).

I terreni in questione costituiscono limiti di permeabilità per gli acquiferi giustapposti verticalmente o lateralmente e, nel contesto idrogeologico di riferimento, rappresentano degli *acquiclude* di notevole importanza per tutti i corpi idrogeologici limitrofi; non sono presenti falde o corpi idrici sotterranei di una certa rilevanza, a meno di piccole falde stagionali all'interno degli orizzonti sabbioso-limosi più permeabili nella parte alta del complesso. La permeabilità, esclusivamente per permeabilità, è variabile da impermeabile a molto bassa. A tale complesso si può quindi attribuire un coefficiente di permeabilità k variabile tra $1 \cdot 10^{-10}$ e $1 \cdot 10^{-7}$ m/s.

2.2.1.2 Substrato sabbioso-ghiaioso

A questo complesso (SSG) sono riferiti i depositi continentali, marini e transizionali delle unità **GII** e **TIR**. Per quanto concerne le caratteristiche litologiche, si tratta di limi sabbiosi e sabbie limose a stratificazione obliqua e a festoni, con locali passaggi di sabbie medio-fini e grossolane; a luoghi si rinvencono livelli di argille limose e argille sabbiose in strati da molto sottili a sottili, più frequenti verso il basso stratigrafico, e strati di arenarie mediamente cementate; verso l'alto passano a ghiaie e blocchi poligenici ed eterometrici, da sub-arrotondati ad arrotondati, da poco a mediamente cementati, in matrice sabbiosa e sabbioso-limoso da scarsa ad abbondante.

Questi depositi costituiscono acquiferi porosi di discreta trasmissività, fortemente eterogenei ed anisotropi; sono sede di falde idriche sotterranee di modesta rilevanza, sia autonome che a deflusso unitario, che presentano interscambi con i corpi idrici sotterranei delle strutture idrogeologiche della piana. La permeabilità, per porosità e fessurazione, prevalentemente bassa. Al complesso in esame si può pertanto attribuire un coefficiente di permeabilità k compreso tra $1 \cdot 10^{-7}$ e $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

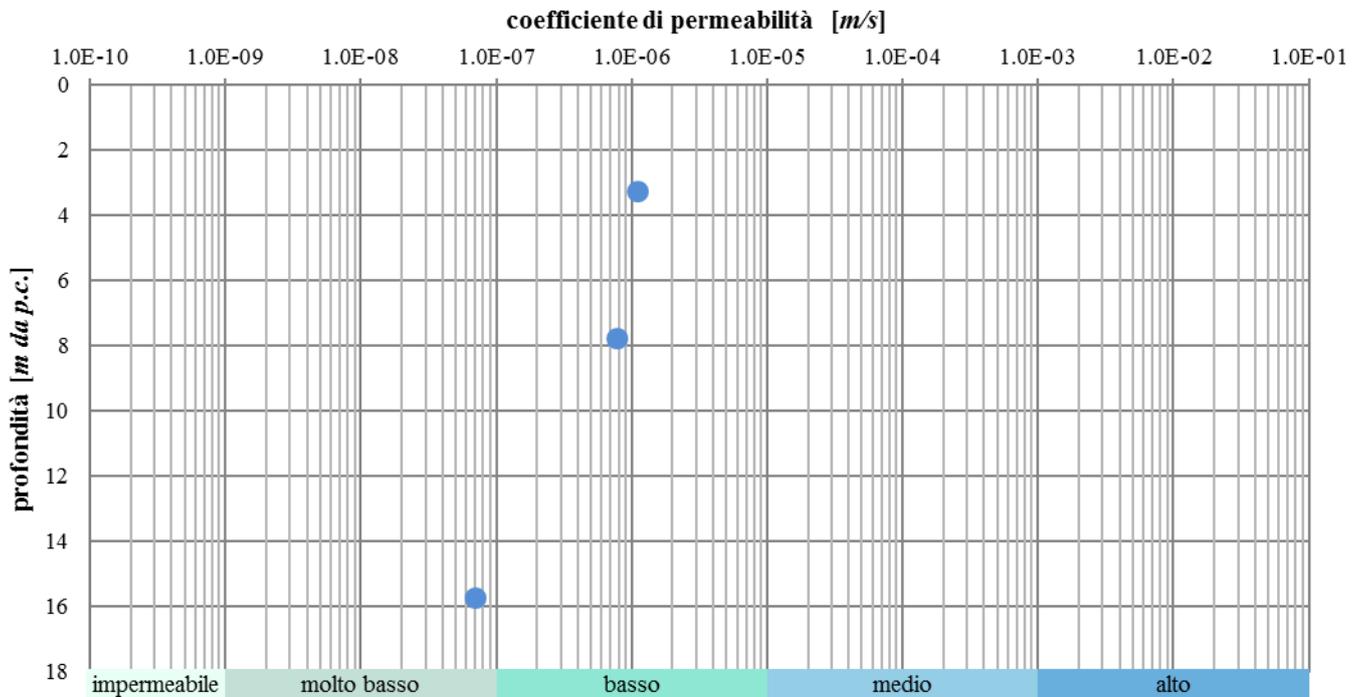


Figura 3 - Grafico di distribuzione del coefficiente di permeabilità in funzione della profondità per il Complesso delle unità del substrato sabbioso-ghiaioso (SSG).

2.2.2 Complessi dei depositi di copertura

Tale gruppo è rappresentato da cinque differenti complessi idrogeologici, composti essenzialmente da depositi quaternari di natura alluvionale, marina, detritico-colluviale e antropica.

2.2.2.1 Terrazzi limoso-sabbiosi

A tale complesso (**TLS**) sono associati i depositi alluvionali terrazzati delle unità **btc** e **btb**. Sotto il profilo litostratigrafico si tratta di limi sabbiosi e sabbie fini e medio-fini a stratificazione obliqua, con diffusi passaggi di limi sabbiosi e conglomerati poligenici; a luoghi si rinvengono intercalazioni di epiclastiti e lenti di ghiaie poligeniche ed eterometriche, da sub-angolose ad arrotondate, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa da scarsa ad abbondante.

I presenti litotipi costituiscono acquiferi porosi di scarsa trasmissività, piuttosto eterogenei ed anisotropi; sono sede di falde idriche sotterranee di ridotta rilevanza, sia autonome che a deflusso unitario, direttamente influenzate dalle precipitazioni meteoriche e con carattere essenzialmente stagionale. La permeabilità, esclusivamente per porosità, è prevalentemente bassa. A questo complesso si può quindi attribuire un coefficiente di permeabilità k variabile tra $1 \cdot 10^{-6}$ e $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

2.2.2.2 Coperture limoso-argillose

Al presente complesso (**CLA**) sono riferiti i terreni pelitici dei depositi di copertura **bn3** e **bb3**. Dal punto di vista litologico si tratta di argille limose e limi da debolmente argillosi ad argillosi a struttura indistinta o laminata, con

sporadiche ghiaie poligeniche da sub-arrotondate ad arrotondate; a luoghi si rinvencono paleosuoli poco evoluti e sottili passaggi di sabbie limose e limi sabbiosi.

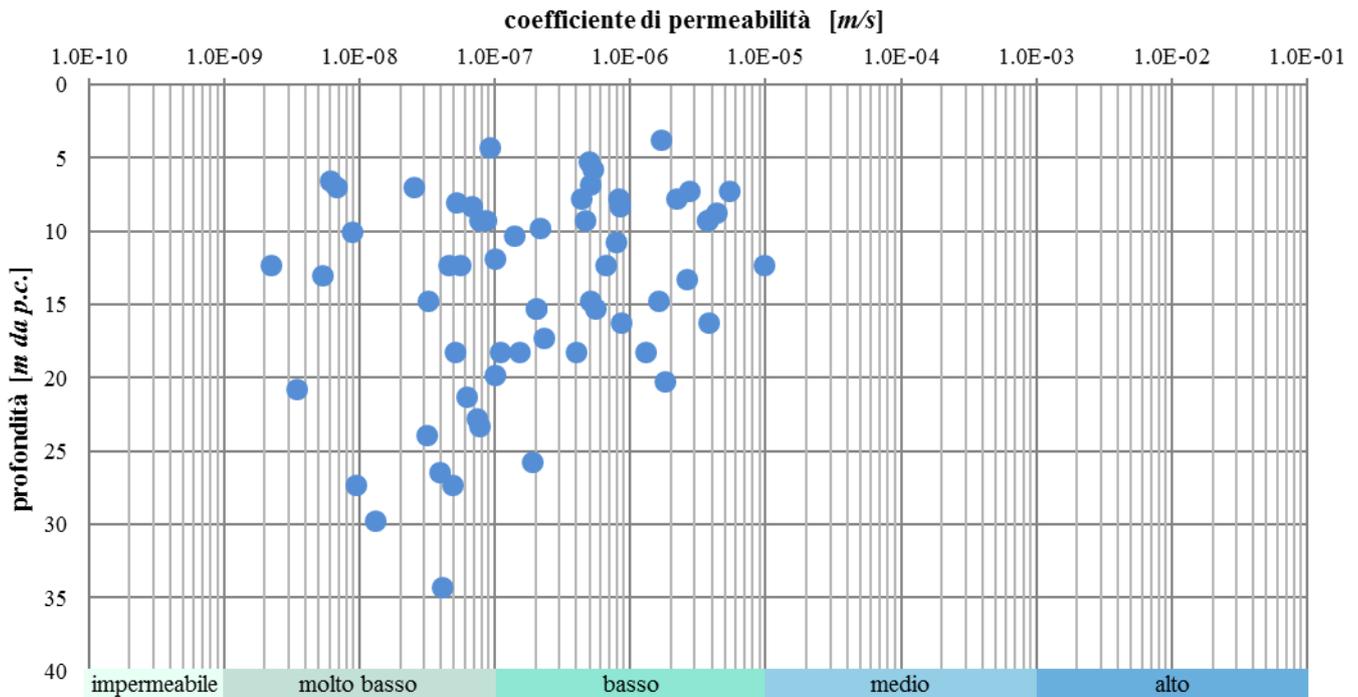


Figura 4 - Grafico di distribuzione del coefficiente di permeabilità in funzione della profondità per il Complesso delle coperture limoso-argillose (CAL).

I termini litologici in esame costituiscono limiti di permeabilità per gli acquiferi giustapposti verticalmente o lateralmente e, nel contesto idrogeologico di riferimento, rappresentano degli acquitard di importanza variabile in relazione all'estensione e allo spessore dei depositi; non sono presenti falde o corpi idrici sotterranei di una certa rilevanza, a meno di piccole falde stagionali all'interno degli orizzonti sabbioso-limosi più permeabili all'interno del complesso. La permeabilità, esclusivamente per permeabilità, è variabile da molto bassa a bassa. A questo complesso si può pertanto attribuire un coefficiente di permeabilità k compreso tra $1 \cdot 10^{-9}$ e $1 \cdot 10^{-6}$ m/s.

2.2.2.3 Coperture sabbioso-limose

A questo complesso (CSL) sono riferiti i depositi quaternari prevalentemente sabbioso-limosi delle unità **gn1**, **gb1**, **ga1**, **bn2**, **bb2** e **ba1**. Dal punto di vista litologico è formato da sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi a struttura indistinta o laminata, con locali ciottoli e ghiaie poligeniche da sub-angolose ad arrotondate, talora appiattite; a luoghi si rinvencono livelli di limi argillosi e lenti di ghiaie poligeniche ed eterometriche, da sub-angolose ad arrotondate, talora appiattite, in matrice sabbiosa e limoso-sabbiosa da scarsa ad abbondante.

Questi depositi costituiscono acquiferi porosi di buona trasmissività, piuttosto eterogenei ed anisotropi; sono sede di falde idriche sotterranee di notevole rilevanza, localmente autonome ma globalmente a deflusso unitario, che presentano interscambi con i corpi idrici superficiali e/o sotterranei delle strutture idrogeologiche limitrofe. La permeabilità, esclusivamente per porosità, è variabile da bassa a media. Al complesso in esame si può pertanto attribuire un coefficiente di permeabilità k compreso tra $1 \cdot 10^{-7}$ e $1 \cdot 10^{-4}$ m/s.

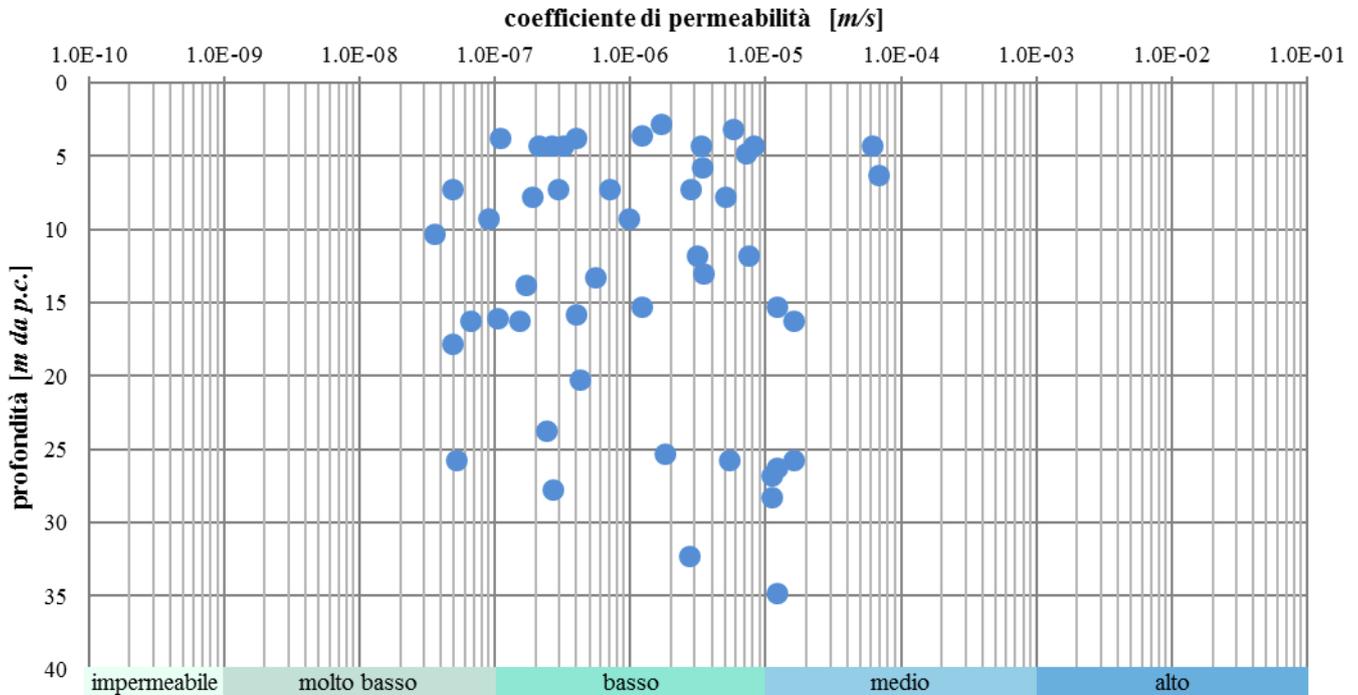


Figura 5 - Grafico di distribuzione del coefficiente di permeabilità in funzione della profondità per il Complesso delle coperture sabbioso-limose (CSL).

2.2.2.4 Coperture ghiaioso-sabbiose

A tale complesso (CGS) sono associati i termini alluvionali grossolani delle unità **bn1** e **bb1**. Sotto il profilo litostratigrafico si tratta di ghiaie poligeniche ed eterometriche, da sub-arrotondate ad arrotondate, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa da scarsa ad abbondante; a luoghi si rinvengono ciottoli e blocchi eterogenei, da appiattiti ad arrotondati, e passaggi di sabbie e sabbie limose.

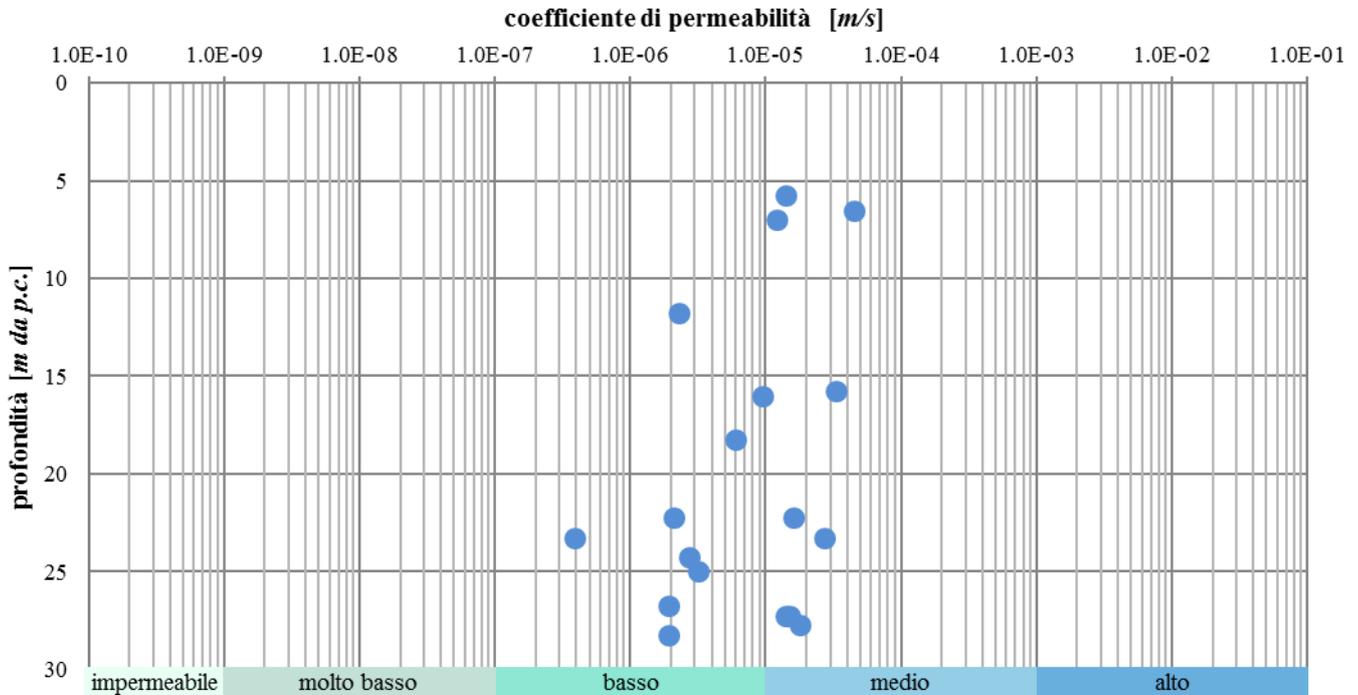


Figura 6 - Grafico di distribuzione del coefficiente di permeabilità in funzione della profondità per il Complesso delle coperture ghiaioso-sabbiose (CGS).

I presenti litotipi costituiscono acquiferi porosi di elevata trasmissività, fortemente eterogenei ed anisotropi; sono sede di falde idriche sotterranee di notevole rilevanza, localmente autonome ma globalmente a deflusso unitario, che presentano interscambi con i corpi idrici superficiali e/o sotterranei delle strutture idrogeologiche limitrofe. La permeabilità, esclusivamente per porosità, è variabile da bassa a media. A questo complesso si può quindi attribuire un coefficiente di permeabilità k variabile tra $1 \cdot 10^{-6}$ e $1 \cdot 10^{-3}$ m/s.

2.2.2.5 Terreni di copertura

Al presente complesso (TRC) sono riferiti i terreni di copertura antropica ed eluvio-colluviale delle unità **b2** e **h**. Dal punto di vista litologico si tratta di limi argilloso-sabbiosi e sabbie argilloso-limose a struttura indistinta, con diffusi resti vegetali, locali ghiaie poligeniche da sub-angolose a sub-arrotondate e sporadici frammenti di laterizi; a luoghi si rinvencono ghiaie poligeniche ed eterometriche, da angolose a sub-arrotondate, con sporadici blocchi e frammenti di laterizi, in matrice limoso-sabbiosa da scarsa ad abbondante.

I termini litologici in esame costituiscono acquiferi porosi di scarsa trasmissività a causa del ridotto spessore dei depositi, piuttosto eterogenei ed anisotropi; sono privi di corpi idrici sotterranei di importanza significativa, a meno di piccole falde a carattere stagionale, direttamente influenzate dal regime delle precipitazioni meteoriche. La permeabilità, esclusivamente per porosità, è variabile da bassa a media. Al complesso in questione è pertanto possibile attribuire un coefficiente di permeabilità k compreso tra $1 \cdot 10^{-7}$ e $1 \cdot 10^{-4}$ m/s.

2.3 Condizioni di deflusso idrico sotterraneo

Tutti i dati raccolti durante il presente studio, di carattere sia geologico che idrogeologico, hanno permesso di definire le caratteristiche peculiari dell'area e di individuare, per grandi linee, il regime di deflusso idrico

sotterraneo proprio dei settori di interesse. Quest'ultimo, in particolare, è direttamente connesso alle caratteristiche di permeabilità dei termini litologici presenti e al locale assetto litostratigrafico dell'area.

Buona parte dei corpi idrogeologici individuati rappresentano, nello schema di circolazione idrica dell'area, degli acquiferi di importanza più o meno significativa, a seconda delle locali caratteristiche di permeabilità dei litotipi e della estensione areale e verticale dei depositi. Ad essi si aggiungono, inoltre, alcuni corpi idrogeologici di ridotta permeabilità che, nello specifico contesto di riferimento, possono essere considerati degli *acquiclude* o al più degli *acquitard*, in quanto tamponano lateralmente e verticalmente gli acquiferi sotterranei più importanti.

I depositi alluvionali e marini che colmano la Piana di Catania e i fondovalle dei principali corsi d'acqua dell'area sono rappresentati da depositi fortemente eterogenei dal punto di vista granulometrico e, pertanto, costituiscono sistemi idrogeologici estremamente articolati e complessi. Il deflusso è direttamente condizionato dalle locali caratteristiche litologiche dei depositi e avviene essenzialmente all'interno degli orizzonti più permeabili in direzione del litorale ionico.

I terreni di copertura a composizione ghiaioso-sabbiosa si rinvencono prevalentemente in profondità, in lenti e/o livelli di limitato spessore ed estensione. In generale, presentano una permeabilità variabile da bassa a media e costituiscono acquiferi porosi di buona trasmissività, piuttosto eterogenei ed anisotropi. Questi depositi sono sede di falde idriche sotterranee di notevole rilevanza, localmente autonome ma globalmente a deflusso unitario, che presentano interscambi con i corpi idrici delle strutture limitrofe. A causa della ridotta loro estensioni, i terreni in questione risultano spesso tamponati o confinati dalle porzioni meno permeabili delle coperture recenti che colmano la piana.

La porzione sabbioso-limosa dei depositi di copertura presenta una notevole estensione latero-verticale e si rinviene diffusamente all'interno di tutta la Piana di Catania. Questi terreni sono caratterizzati da una permeabilità variabile da bassa a media e, pertanto, costituiscono acquiferi porosi di buona trasmissività, piuttosto eterogenei ed anisotropi. Nonostante i modesti valori di permeabilità, tali depositi sono sede di falde idriche sotterranee di notevole rilevanza, soprattutto a causa della loro notevole estensione. Le falde sono localmente autonome ma globalmente a deflusso unitario, con frequenti interscambi con i corpi idrici superficiali e/o sotterranei delle strutture idrogeologiche limitrofe.

I termini prevalentemente pelitici dei terreni di copertura sono piuttosto diffusi nei settori di piana e presentano maggiore continuità ed estensione nella porzione più superficiale della sequenza fluvio-marina. A causa della loro ridotta permeabilità, questi terreni costituiscono dei limiti per gli acquiferi giustapposti verticalmente o lateralmente e, nel contesto idrogeologico di riferimento, rappresentano degli *acquitard* di importanza variabile in relazione all'estensione e allo spessore dei depositi. Generalmente non sono presenti falde o corpi idrici sotterranei di una certa rilevanza, anche se localmente possono incontrarsi piccole falde stagionali all'interno degli orizzonti psammitici intercalati all'interno della frazione pelitica.

I depositi terrazzati presenti al margine della piana, a composizione prevalentemente limoso-sabbiosa, presentano limitato spessore ed estensione, in quanto formati da piccoli lembi in appoggio su termini litologici del substrato. Questi depositi presentano una permeabilità prevalentemente bassa e, quindi, costituiscono acquiferi porosi di scarsa trasmissività, piuttosto eterogenei ed anisotropi. A causa del loro ridotto spessore, tali terreni sono sede di falde idriche sotterranee di ridotta rilevanza, sia autonome che a deflusso unitario, direttamente influenzate dalle precipitazioni meteoriche e con carattere essenzialmente stagionale.

I depositi di copertura più recenti, di genesi antropica e detritico-colluviale, sono caratterizzati da una permeabilità estremamente variabile ma, a causa del ridotto spessore, sono in genere privi di falde e corpi idrici sotterranei di una certa rilevanza. Localmente, ove sussistono le adeguate condizioni idrogeologiche ed è presente un livello

meno permeabile alla base, è possibile che si formino piccole falde a carattere stagionale, direttamente influenzate dal regime delle precipitazioni meteoriche o dagli apporti connessi all'attività antropica nell'area.

I termini sabbioso-ghiaiosi del substrato si rinvencono localmente lungo il margine nord-occidentale della Piana di Catania, in appoggio sui depositi pelitici più antichi. Generalmente, questi terreni costituiscono acquiferi porosi di discreta trasmissività, fortemente eterogenei ed anisotropi, sede di falde idriche sotterranee di modesta rilevanza, sia autonome che a deflusso unitario. Le caratteristiche delle falde sono condizionate dallo spessore dei depositi e, soprattutto, dalla presenza del substrato pelitico impermeabile alla base degli stessi. Le falde presenti in questi depositi alimentano i corpi idrici sotterranei degli acquiferi presenti nella Piana di Catania, con cui sono in contatto sia lateralmente che verticalmente.

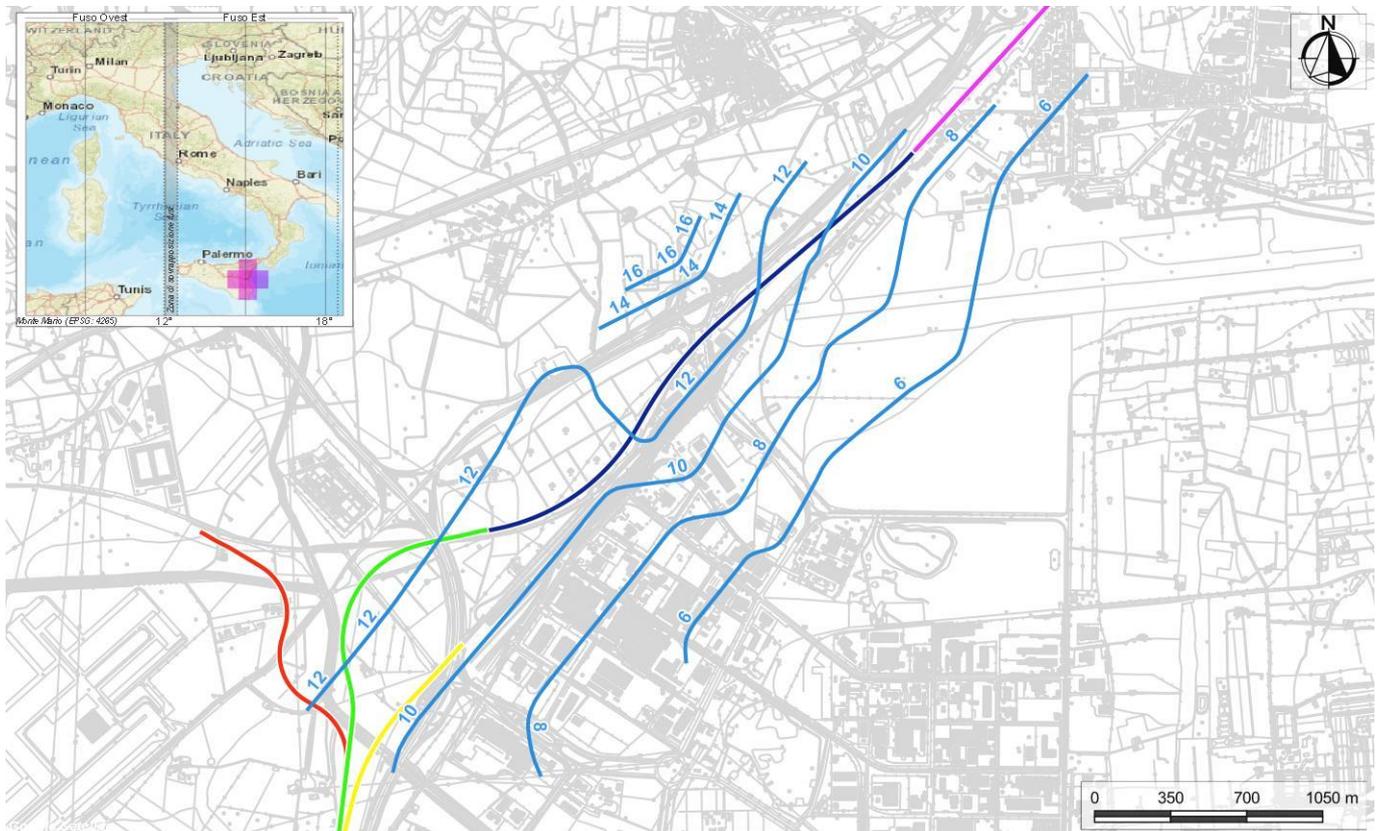


Figura 7 – Andamento della superficie piezometrica (in azzurro) nella porzione più settentrionale dell'area di studio, ricostruita sulla scorta delle misure piezometriche del mese di maggio 2019; in carta sono indicate le tratte ferroviarie in progetto (in magenta la tratta relativa al lotto “Stazione di Fontanarossa”, in blu la tratta relativa al lotto “Tratto linea interferente con la pista”, in verde la tratta relativa al lotto “Bretella Catania-Siracusa”, in rosso la tratta relativa al lotto “Bretella Palermo-Siracusa”, in giallo la tratta relativa al lotto “Collegamento dal fascio A/P al Terminal Merci”).

Infine, i termini prevalentemente pelitici del substrato presentano una permeabilità estremamente bassa, talora fino a impermeabile, e pertanto non sono sede di falde o corpi idrici sotterranei di una certa rilevanza. Tali terreni tamponano lateralmente e verticalmente molti degli acquiferi sotterranei più importanti e quindi, nello schema di circolazione idrica sotterranea della zona di studio, possono essere considerati come degli *acquiclude*.



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO
NODO DI CATANIA

INTERRAMENTO LINEA PER IL PROLUNGAMENTO DELLA
PISTA DELL'AEROPORTO DI FONTANAROSSA E PER LA MESSA
A STI DEL TRATTO DI LINEA INTERESSATO.

RELAZIONE MODELLAZIONE IDROGEOLOGICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3H	00	D69RH	GE 00 02 002	A	14 di 70

In generale, l'area di studio è caratterizzata dalla presenza di una estesa falda freatica che defluisce all'interno dei depositi fluvio-marini che colmano la Piana di Catania. La falda defluisce grossomodo da NW a SE, dai settori interni verso il Mar Ionio. La falda è contenuta all'interno degli orizzonti più grossolani e permeabili ed è sostenuta, alla base, dai termini pelitici a bassissima permeabilità del substrato. Il deflusso è spesso suddiviso dagli orizzonti pelitici presenti all'interno della successione di riempimento della piana, anche se a grande scala presenta un carattere unitario.

In planimetria, la superficie piezometrica è stata ricostruita unicamente per la porzione più settentrionale del settore di studio, dove sono previsti gli interventi con possibile impatto sul regime di circolazione idrica sotterranea dell'area (Figura 7). Al fine di avere un dato uniforme dal punto di vista temporale, l'andamento della superficie piezometrica è stato ricostruito utilizzando i dati di monitoraggio di maggio 2019. Come visibile dalla carta, il deflusso avviene prevalentemente da NW verso SE, con gradienti estremamente bassi compatibili con le caratteristiche morfologiche ed idrogeologiche dell'area.

Nella porzione centrale dell'area investigata è presente un piccolo spartiacque sotterraneo orientato circa NW-SE, mentre nei restanti settori si registrano due importanti assi di drenaggio connessi con le caratteristiche idrogeologiche dei depositi e con l'andamento morfologico del substrato impermeabile. Le misure a disposizione hanno evidenziato un notevole disturbo prodotto dalle opere di captazione presenti nella zona industriale di Catania, che localmente abbattano il livello di falda ben al di sotto della quota media che caratterizza la superficie piezometrica. Nelle ricostruzioni planimetriche questi dati sono stati scartati, in quanto poco rappresentativi del regime di circolazione idrica sotterranea dell'area.

Nei settori più interni la falda è fortemente influenzata dall'andamento del substrato e si colloca a quote variabili tra i 14 ed i 16 m circa s.l.m.. Procedendo verso il litorale ionico, la quota di falda tende a deprimersi, fino a raccordarsi col livello di base rappresentato dal Mar Ionio. In corrispondenza del tracciato in progetto, la superficie piezometrica è posta a quote variabili tra i 9 ed i 13 m circa s.l.m., con valori massimi nella zona centrale dove è presente lo spartiacque sotterraneo descritto in precedenza.

3 ANALISI NUMERICHE

Le modellazioni numeriche del flusso sono state sviluppate al fine di verificare la possibile influenza esercitata dalle opere in progetto sul regime di circolazione idrica dell'area e le eventuali variazioni del livello di falda a seguito della realizzazione delle opere. Le modellazioni sono state condotte su n. 3 sezioni trasversali al tracciato di progetto (Figura 8). Le sezioni sono tutte situate nella porzione più settentrionale dell'area di studio, che risulta essere la più critica dal punto di vista delle potenziali interferenze tra le opere il progetto e la falda idrica sotterranea presente nei settori di intervento.

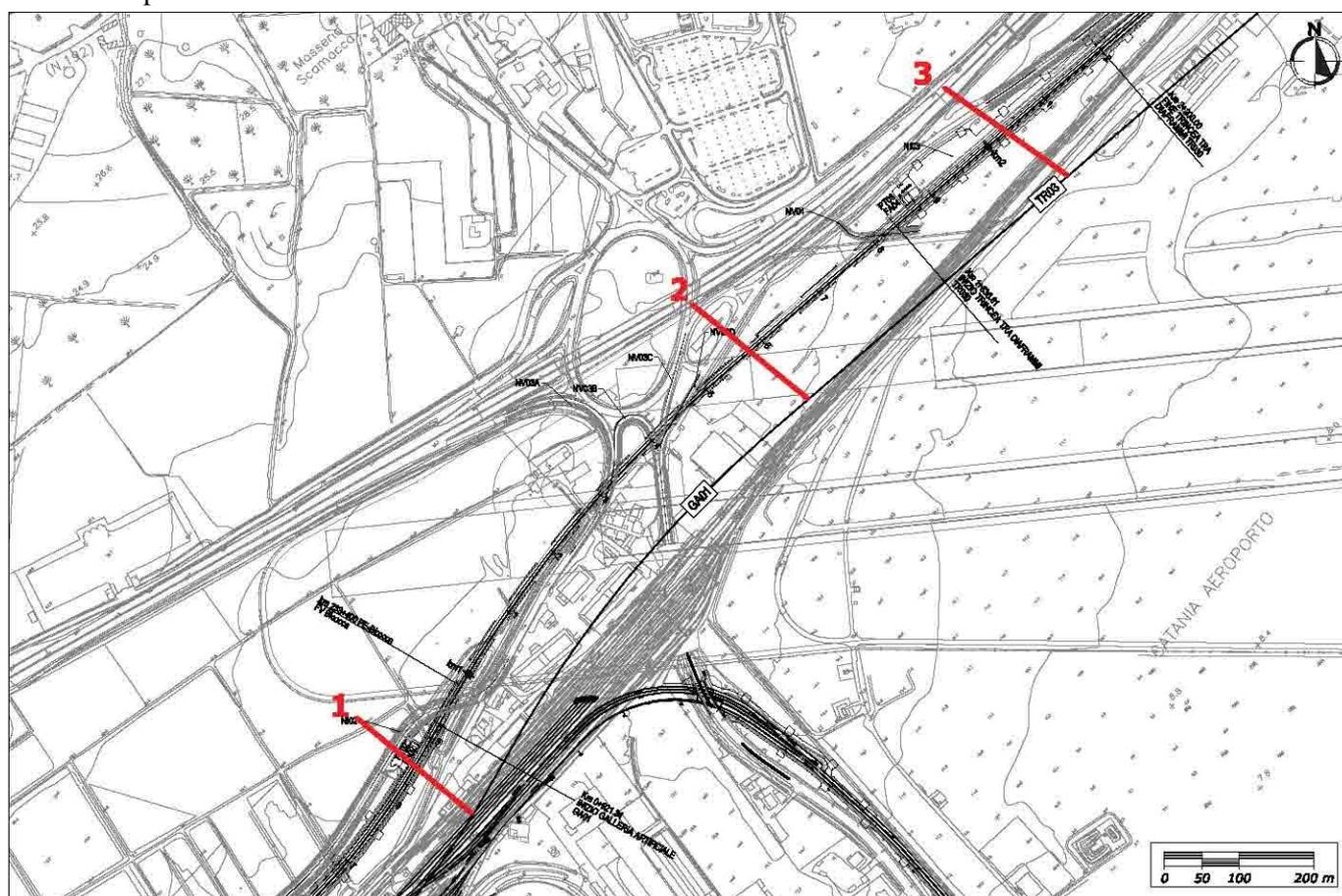


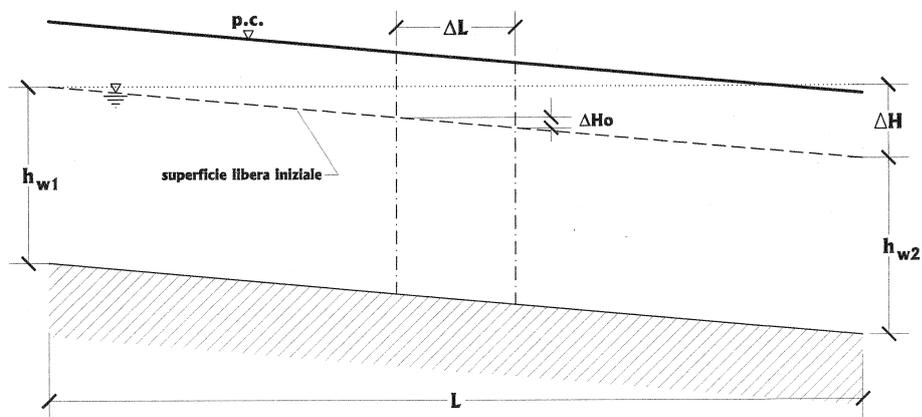
Figura 8 – Ubicazione delle n. 3 sezioni analizzate attraverso le modellazioni numeriche del flusso.

3.1 Impostazione del problema

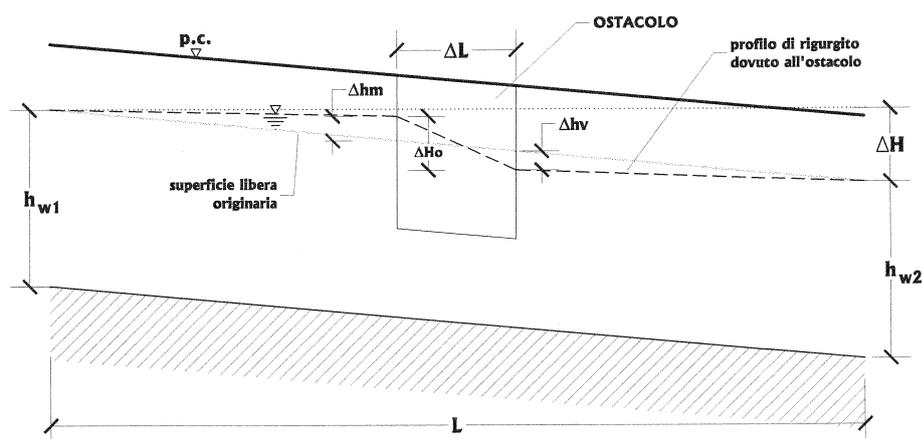
Gli acquiferi e i corpi geologici in corrispondenza di ogni sezione sono stati ricostruiti sulla scorta dei dati e delle analisi geologiche appositamente condotte per il presente studio. Per quanto riguarda il livello di falda nella condizione indisturbata, sono stati utilizzati i dati di monitoraggio relativi al mese di maggio 2019, che presenta una copertura completa di tutte le strumentazioni e risulta altresì cautelativo in quanto caratterizzato da valori del livello di falda più elevati di quelli registrati negli altri mesi.

Le verifiche sono state condotte al fine di analizzare, per ogni singola sezione, differenti condizioni idrogeologiche. La prima è relativa alla condizione naturale, prima della realizzazione dell'opera, mentre la seconda è relativa alla condizione di progetto, a seguito della realizzazione degli interventi. Ove previsto dal progetto (Sezioni 2 e 3), è stata considerata una terza condizione, relativa all'inserimento di un by-pass idraulico costituito da un setto drenante ad elevata permeabilità.

In tal modo è stato possibile analizzare le potenziali variazioni del livello di falda e della circolazione idrica sotterranea dei settori di studio indotte dalla realizzazione delle opere in progetto e, ove necessario, a seguito dell'inserimento del by-pass idraulico. Una semplificazione delle prime due condizioni analizzate attraverso le modellazioni numeriche è riportata in Figura 9.



a - Condizione iniziale



b - Effetto dell'ostacolo

Figura 9 – Esempi delle due differenti condizioni analizzate attraverso le modellazioni numeriche appositamente condotte: a) condizione iniziale; b) effetto dell'ostacolo.

Per una corretta valutazione della possibile interferenza dei manufatti in progetto con la falda sono stati assunti dei modelli di calcolo con una larghezza di circa 200 m ed una altezza di circa 50 m (poco meno di 2 volte la

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NODO DI CATANIA					
	INTERRAMENTO LINEA PER IL PROLUNGAMENTO DELLA PISTA DELL'AEROPORTO DI FONTANAROSSA E PER LA MESSA A STI DEL TRATTO DI LINEA INTERESSATO.					
RELAZIONE MODELLAZIONE IDROGEOLOGICA	COMMESSA RS3H	LOTTO 00	CODIFICA D69RH	DOCUMENTO GE 00 02 002	REV. A	FOGLIO 17 di 70

profondità delle opere). Tutte le sezioni sono sufficientemente profonde da consentire l'analisi completa dell'opera ed il corretto inserimento del substrato impermeabile, che come noto condiziona fortemente la circolazione idrica sotterranea dei settori di intervento.

Le condizioni iniziali precedenti la realizzazione dell'ostacolo sono rappresentate nella Figura 9a, dove è indicato un dislivello piezometrico ΔH corrispondente alla larghezza del modello. Gli effetti dell'ostacolo sono invece indicati nella Figura 9b. A monte si ha un innalzamento del livello piezometrico rispetto a quello iniziale pari a Δh_m , mentre a valle si ha un abbassamento Δh_v .

3.2 Codice di calcolo utilizzato

Per lo studio del problema in esame è stato utilizzato il codice di calcolo agli elementi finiti PLAXIS 2D versione 8.6. Il software schematizza il sottosuolo con degli elementi bidimensionali triangolari a 15 nodi integrazione, nell'ipotesi di una condizione di deformazione piana. Complessivamente, i modelli sono vincolati con *constraints* completi alla base, mentre ai nodi delle linee di frontiera verticale, in chiusura dei domini di interesse, viene impedita la traslazione orizzontale.

Il codice di calcolo fa diretto riferimento alla legge di Darcy, che governa il moto di un fluido in un mezzo poroso, secondo le seguenti espressioni:

$$q_x = -k_x \frac{\partial \varphi}{\partial x}$$

$$q_y = -k_y \frac{\partial \varphi}{\partial y}$$

dove:

- q rappresenta la portata;
- φ è il carico idraulico;
- k è il coefficiente di permeabilità.

Il carico idraulico risulta invece definito come:

$$\varphi = y - \frac{p}{\gamma_w}$$

in cui:

- y è la posizione verticale;
- p è pressione interstiziale;
- γ_w è il peso di volume dell'acqua.

3.3 Descrizione delle analisi

Come accennato in precedenza, per lo studio del problema sono state analizzate n. 3 sezioni rappresentative delle condizioni registrate nella porzione più settentrionale della zona di intervento, dove è prevista la realizzazione di diverse opere potenzialmente interferenti col regime di circolazione idrica sotterranea dell'area. Queste ultime, in particolare, sono rappresentate da trincee e gallerie artificiali a due binari, occupanti una porzione di terreno con una larghezza di circa 14.2 m. La lunghezza delle paratie che costituiscono le opere è compresa tra 31.8 e 35.0 m,

mentre la loro profondità al di sotto p.c. è variabile in funzione delle locali condizioni morfologiche e della posizione del piano ferro.

I modelli prevedono domini di studio con una larghezza di circa 200 m ed una altezza di circa 50 m (poco meno di 2 volte la profondità delle opere). Tutte le sezioni sono sufficientemente profonde da consentire l'analisi completa dell'opera ed il corretto inserimento del substrato impermeabile. In corrispondenza dei bordi, la falda è ubicata alla quota desunta dall'interpolazione dei dati piezometrici del mese di maggio 2019.

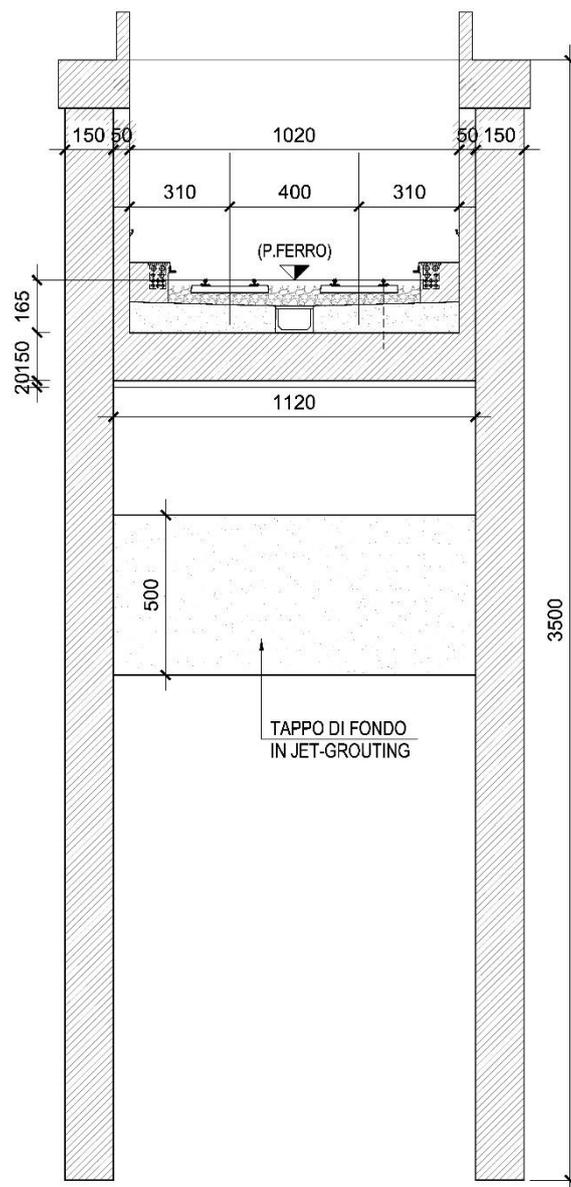


Figura 10 – Schema semplificato delle opere in progetto in corrispondenza della Sezione 1.

Le analisi sono state condotte secondo due fasi successive. In una prima fase si è effettuata la determinazione delle caratteristiche del moto nelle condizioni iniziali, cioè in assenza delle opere in progetto. Nella seconda fase sono

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NODO DI CATANIA INTERRAMENTO LINEA PER IL PROLUNGAMENTO DELLA PISTA DELL'AEROPORTO DI FONTANAROSSA E PER LA MESSA A STI DEL TRATTO DI LINEA INTERESSATO.					
	RELAZIONE MODELLAZIONE IDROGEOLOGICA	COMMESSA RS3H	LOTTO 00	CODIFICA D69RH	DOCUMENTO GE 00 02 002	REV. A

stati determinati gli effetti dell'ostacolo (Figura 10), modellato come elemento *screen*, e dunque impermeabile, individuando a monte un innalzamento Δh_m e a valle un abbassamento Δh_v del livello piezometrico rispetto a quello iniziale.

Nelle Sezioni 2 e 3 il progetto prevede anche la realizzazione di un by-pass idraulico, costituito da una trincea drenante posta al di sotto del solettone inferiore dell'opera, con una permeabilità $k = 1$ m/s e dimensioni pari a $B = 1.5$ m e $H = 1.0$ m. Planimetricamente, le trincee sono poste a circa 20 m di distanza le une dalle altre. Per queste due sezioni, quindi, è stata condotta una terza fase di analisi, al fine di analizzare l'influenza indotta dal by-pass sul regime di circolazione idrica dell'area.

3.4 Parametri idrogeologici di ingresso

Per la modellazione del deflusso idrico sotterraneo e la valutazione delle interferenze prodotte dalle opere in progetto, sono stati analizzate le risultanze di tutte le indagini geognostiche e prove di permeabilità in foro appositamente condotte nell'ambito del presente studio. In corrispondenza delle differenti sezioni di calcolo, il sottosuolo dell'area di studio è stato schematizzato attraverso n. 5 complessi idrogeologici, a cui si aggiungono le opere in progetto.

I diversi complessi idrogeologici, descritti in precedenza, sono stati caratterizzati rispetto alle prove di permeabilità in foro a disposizione e alle specifiche caratteristiche litologiche di ognuno. Il coefficiente di permeabilità orizzontale k_h è stato attribuito sulla scorta del *range* di variabilità delle caratteristiche idrogeologiche di ogni complesso, cercando ove possibile di considerare il valore medio o comunque un valore sufficientemente cautelativo. Il coefficiente di permeabilità verticale k_v è stato invece calcolato partendo dal precedente e diminuendo i valori di circa 5 volte ($k_v = k_h / 5$), al fine di considerare la nota anisotropia idraulica degli acquiferi di piana alluvionale.

Nel seguito, si riportano tutti i parametri idrogeologici dei diversi complessi analizzati nelle modellazioni numeriche di flusso:

- **Substrato argilloso-limoso**
 - Coefficiente di permeabilità orizzontale $k_h = 5 \cdot 10^{-8}$ m/s.
 - Coefficiente di permeabilità verticale $k_v = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s.
- **Coperture limoso-argillose**
 - Coefficiente di permeabilità orizzontale $k_h = 5 \cdot 10^{-7}$ m/s.
 - Coefficiente di permeabilità verticale $k_v = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s.
- **Coperture sabbioso-limose**
 - Coefficiente di permeabilità orizzontale $k_h = 5 \cdot 10^{-5}$ m/s.
 - Coefficiente di permeabilità verticale $k_v = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s.
- **Coperture ghiaioso-sabbiose**
 - Coefficiente di permeabilità orizzontale $k_h = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s.
 - Coefficiente di permeabilità verticale $k_v = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s.
- **Terreni di copertura**
 - Coefficiente di permeabilità orizzontale $k_h = 5 \cdot 10^{-5}$ m/s.
 - Coefficiente di permeabilità verticale $k_v = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Come accennato in precedenza, le opere in progetto sono state modellate come un elemento *screen* e, quindi, perfettamente impermeabili. Tali elementi sono stati tenuti attivi solo durante la seconda fase di analisi, mentre durante le verifiche in assenza di opere sono state mantenute inattive. In tutte le fasi di calcolo, il modello è stato lasciato idraulicamente libero lungo entrambe i lati, mentre è stato considerato a flusso nullo verso il basso.

4 RISULTATI DELLE ANALISI NUMERICHE

Nel seguito vengono descritte, in dettaglio, tutte le analisi numeriche condotte lungo le tre sezioni di calcolo e i relativi risultati ottenuti.

4.1 Sezione 1

La **sezione 1** è caratterizzata da una trincea a due binari, con piano ferro posto a circa 11.75 m s.l.m.. La larghezza dell'opera è di circa 14.20 m mentre la profondità massima di circa 35.0 m. In questa sezione non è previsto l'inserimento di by-pass.

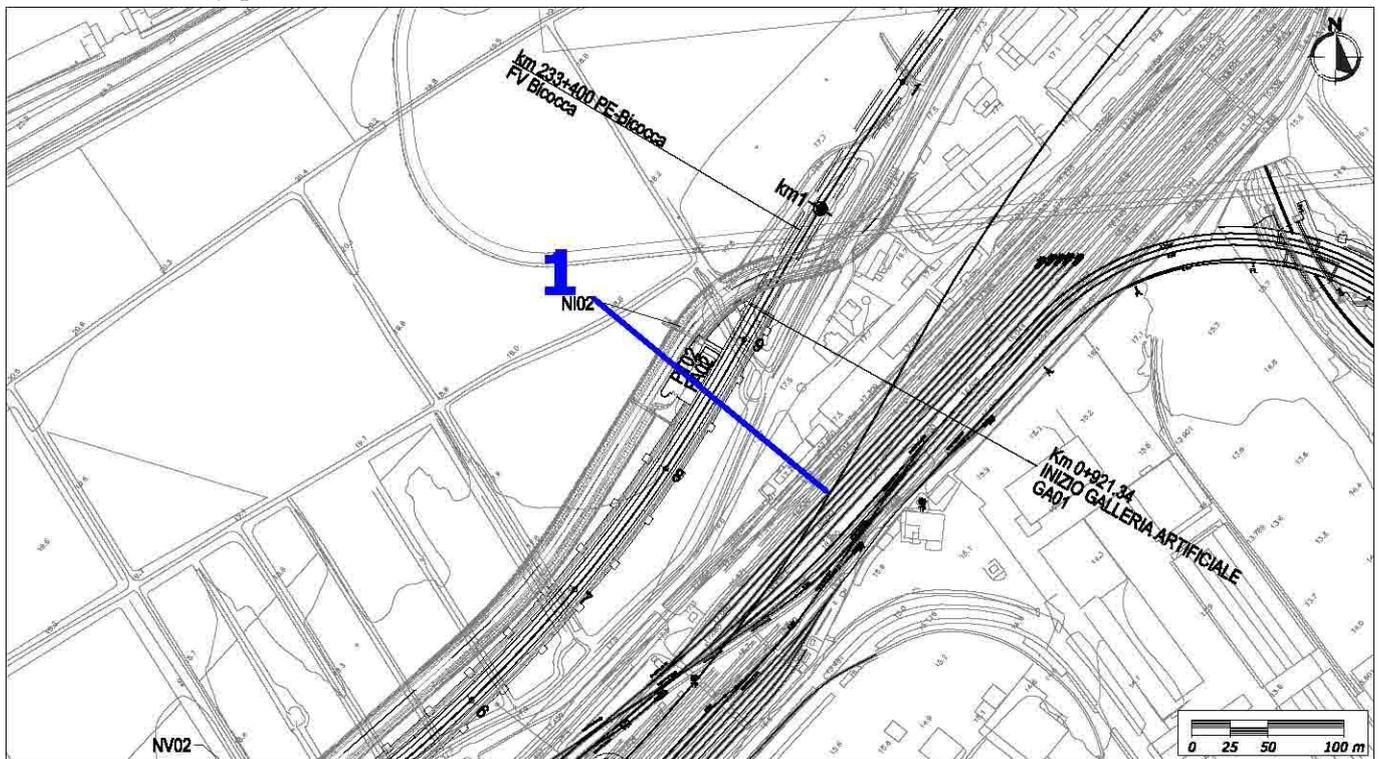


Figura 11 - Stralcio cartografico di ubicazione della traccia della Sezione 1 (in blu), con indicazione del tracciato di progetto (in nero).

Il modello prevede un dominio di studio con una profondità di circa 50 m (poco meno di 2 volte la profondità dell'opera) ed una larghezza di 200 m (circa 14 volte la larghezza dell'opera).

La quota del piano campagna è variabile tra 18.9 m s.l.m. e 16.8 m s.l.m., con una pendenza media di circa 1.05% (0.60°).

In corrispondenza dei bordi del modello la falda è ubicata a quota $h_{sx} = 12.07$ m s.l.m. ($x = -100.0$ m) e $h_{dx} = 12.34$ m s.l.m. ($x = +100.0$ m), con un dislivello totale $\Delta H = 0.27$ m e una pendenza di circa 0.14% (0.08°). A causa dei ridotti gradienti piezometrici e della locale inversione di pendenza, prodotta probabilmente da emungimenti antropici, non è stato possibile modellare il flusso utilizzando tale configurazione della superficie piezometrica.

Per tale motivo, il modello di flusso è stato realizzato incrementando leggermente il gradiente piezometrico, al fine di favorire il corretto svolgimento delle analisi. Il tutto senza mutare in maniera sensibile la quota falda e le condizioni idrogeologiche dell'area. Pertanto, è stata utilizzata da una quota falda di ingresso $h_{sx} = 12.70$ m s.l.m. ($x = -100.0$ m) e una quota falda di uscita $h_{dx} = 11.80$ m s.l.m. ($x = +100.0$ m).

In corrispondenza dell'opera, la falda modellata è posta a quota $h_{sx} = 12.28$ m s.l.m. lato monte e $h_{dx} = 12.23$ m s.l.m. lato valle. In questo caso, la quota lato monte della falda introdotta nel modello è praticamente identica a quella del caso reale, mentre quella lato valle è posta solo 12 cm più in basso del caso reale.

4.1.1 Flusso nella condizione iniziale

Inizialmente è stato analizzato il flusso nella condizione attuale, prima della realizzazione dell'opera (Figura 12). In superficie, l'area è caratterizzata da un'alternanza di orizzonti sabbioso-limosi e limoso-argillosi, con spessori di qualche metro, in appoggio su un substrato prevalentemente pelitico. Nella parte bassa della successione di copertura, immediatamente al di sopra del substrato, si rinvencono intercalazioni di ghiaie e ghiaie sabbiose di elevata permeabilità.

Ai fini modellistici, per consentire al modello di andare a convergenza senza produrre anomalie di calcolo, non è stato possibile simulare separatamente tutti i singoli orizzonti che costituiscono la successione sedimentaria di copertura: Pertanto, in fase di costruzione del modello sono stati accorpati i livelli sabbioso-limosi e ghiaioso-sabbiosi in un unico orizzonte. Date le caratteristiche dei terreni e la netta prevalenza della frazione grossolana, tale orizzonte è stato cautelativamente modellato con i parametri idrogeologici delle coperture ghiaioso-sabbiose.

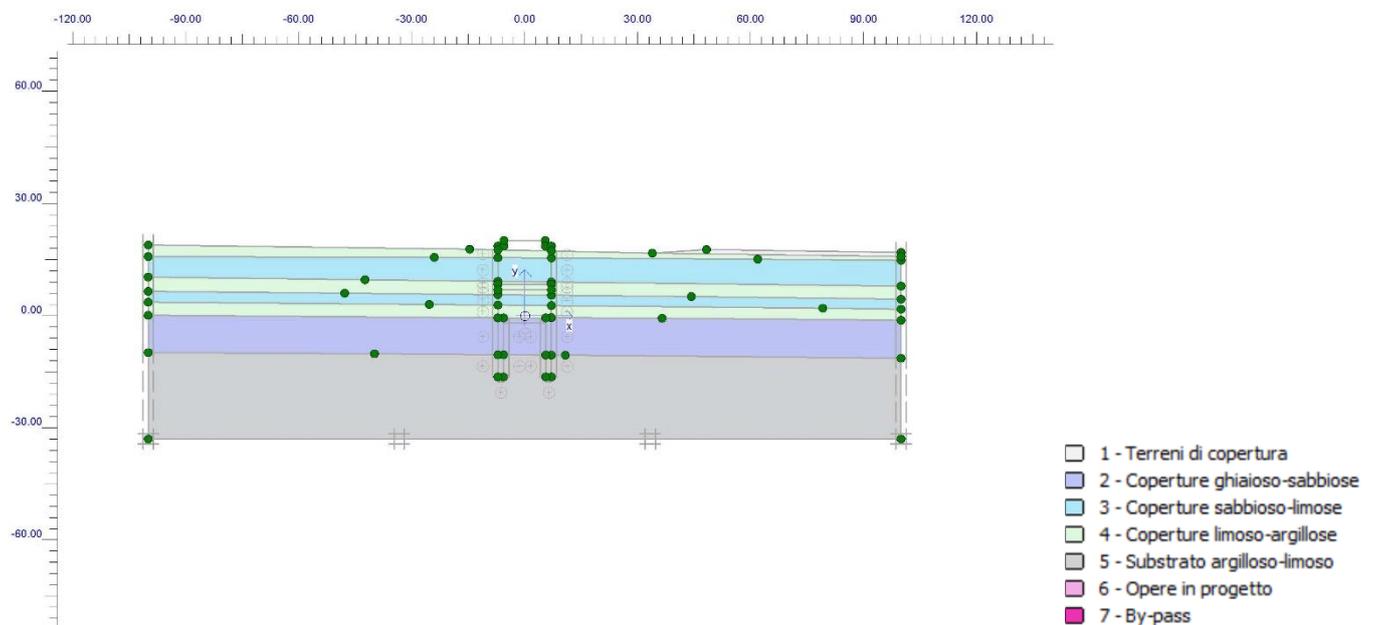


Figura 12 – Modello geologico utilizzato per l'analisi del flusso nella condizione iniziale.

Dal punto di vista idrogeologico, la falda nella condizione iniziale è stata ricostruita secondo i criteri descritti in precedenza (Figura 13).

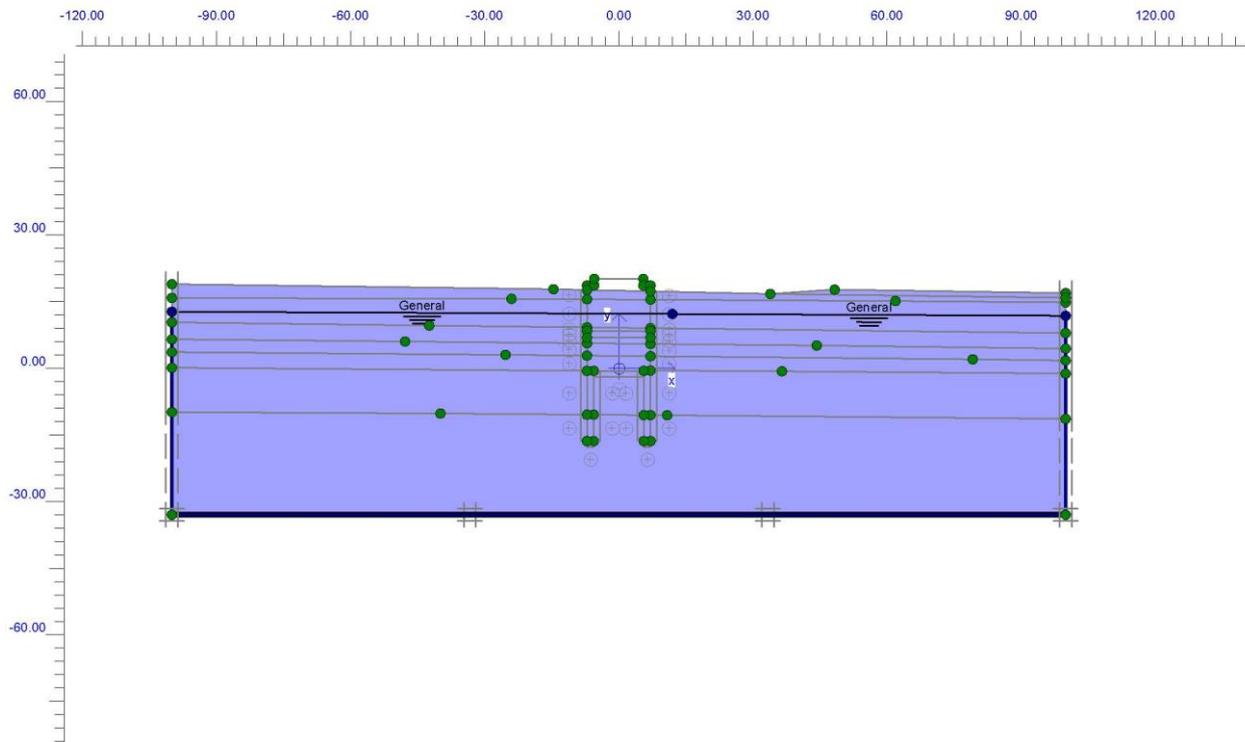


Figura 13 – Modello idrogeologico e livello di falda utilizzati per l'analisi del flusso nella condizione iniziale.

Come visibile nel seguito (Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17), il modello riesce a simulare il livello di falda definito inizialmente. Nella parte più superficiale, il deflusso avviene principalmente in corrispondenza degli orizzonti sabbioso-limosi più permeabili, mentre in profondità esso si concentra nel livello ghiaioso-sabbioso più permeabile in appoggio sul substrato pelitico (Figura 14).

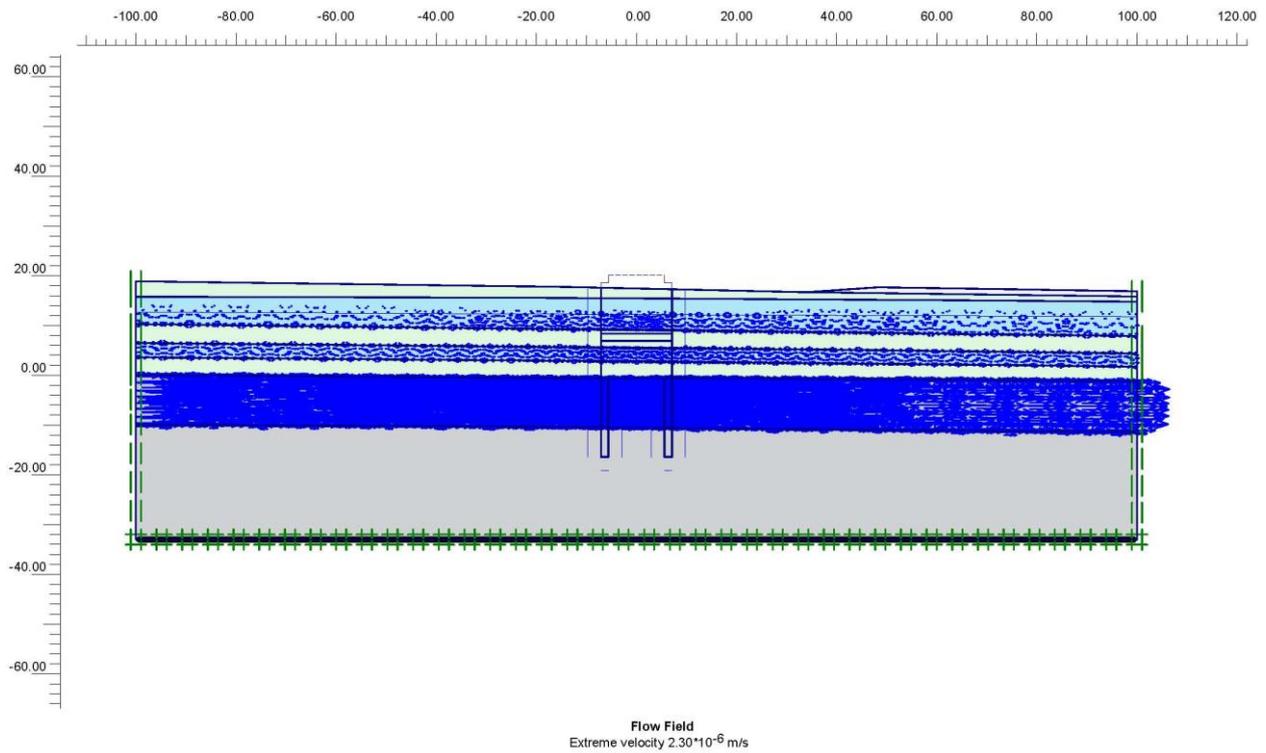


Figura 14 – Andamento dei vettori di flusso nella condizione iniziale.

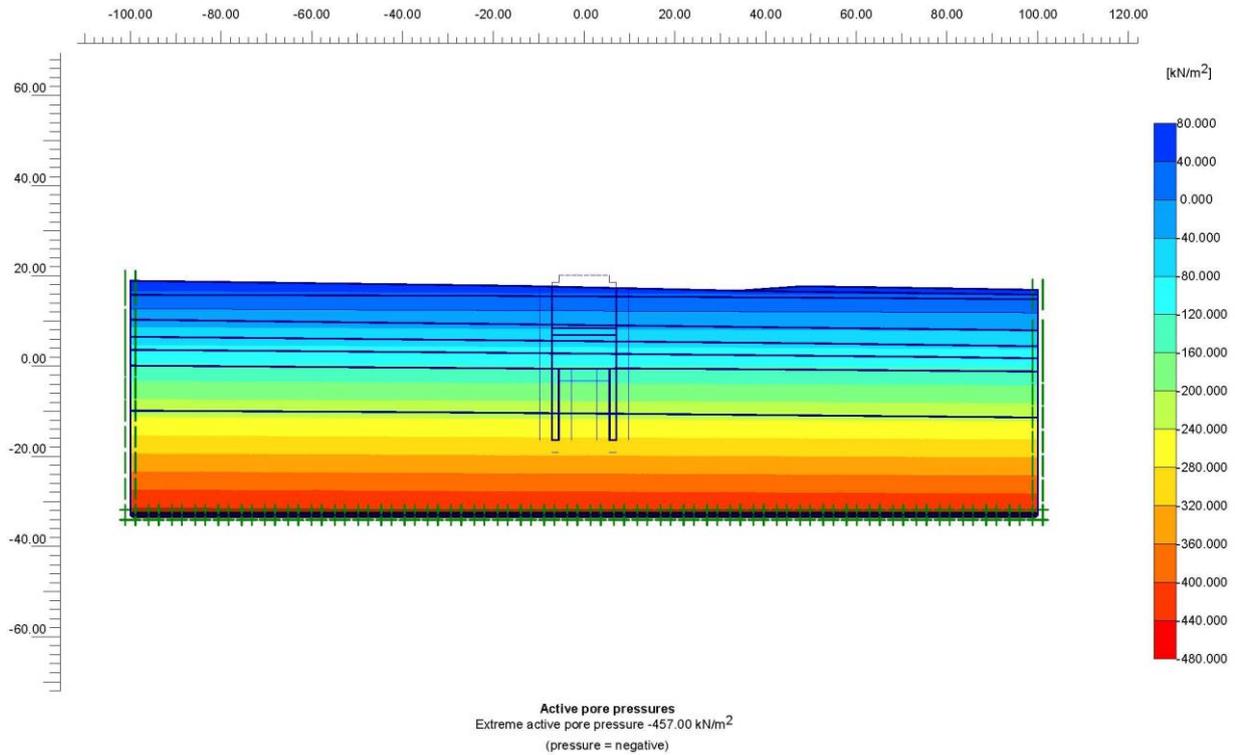


Figura 15 – Andamento delle pressioni interstiziali nella condizione iniziale.

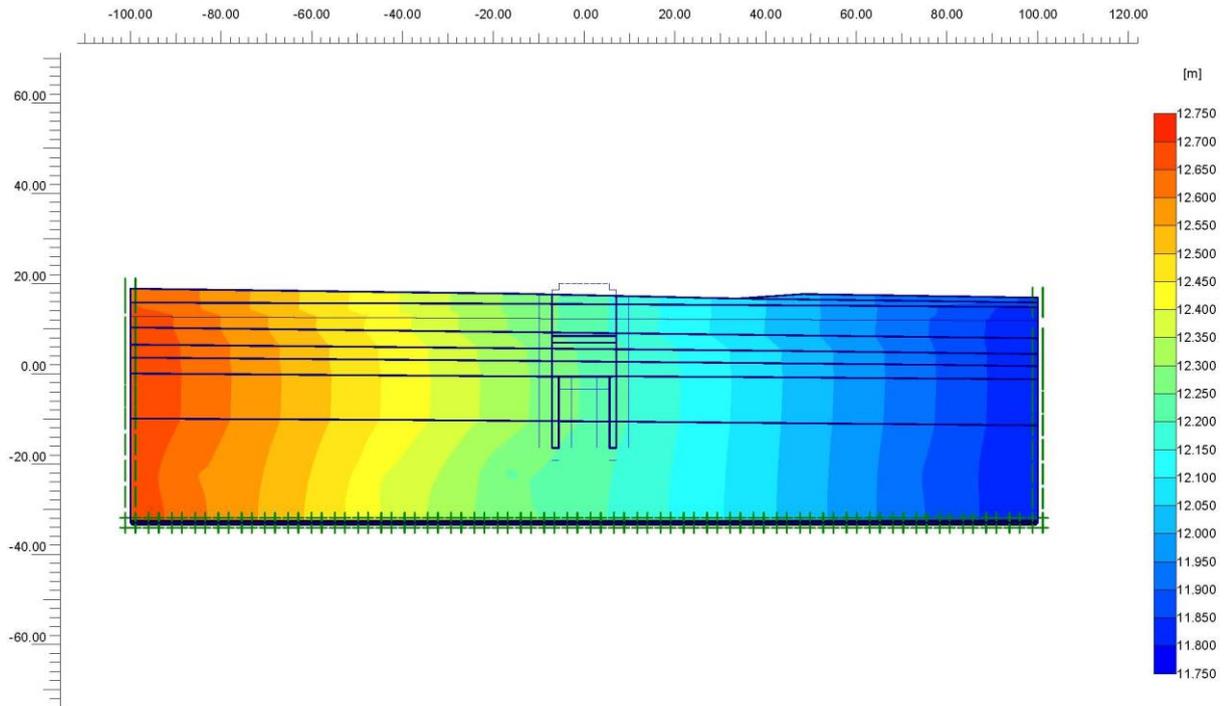


Figura 16 – Andamento delle linee equipotenziali nella condizione iniziale.

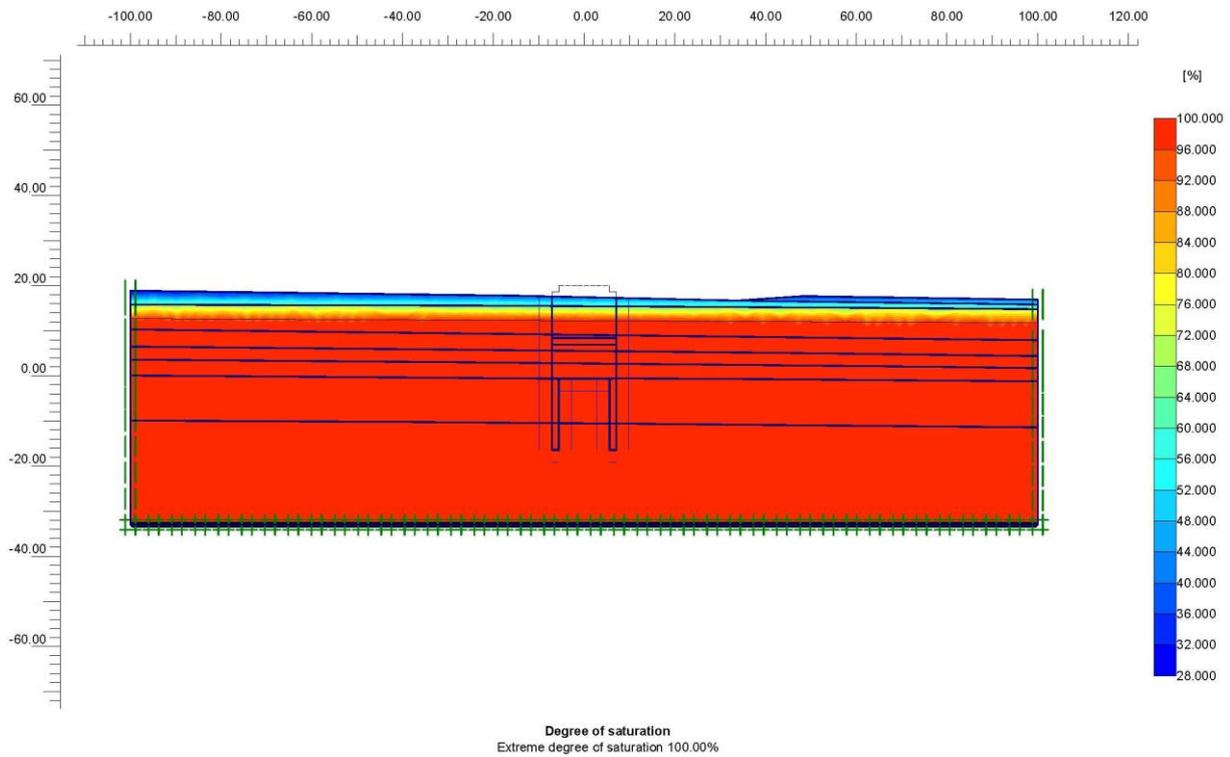


Figura 17 – Grado di saturazione dei terreni nella condizione iniziale.

4.1.2 Flusso dopo la realizzazione dell'opera

Per poter valutare l'interferenza prodotta dagli interventi in progetto sul deflusso idrico sotterraneo dell'area, nel modello iniziale è stata inserita l'opera in questione (Figura 18, Figura 19). Dal punto di vista modellistico, l'opera è costituita da un mezzo non poroso e, quindi, praticamente impermeabile.

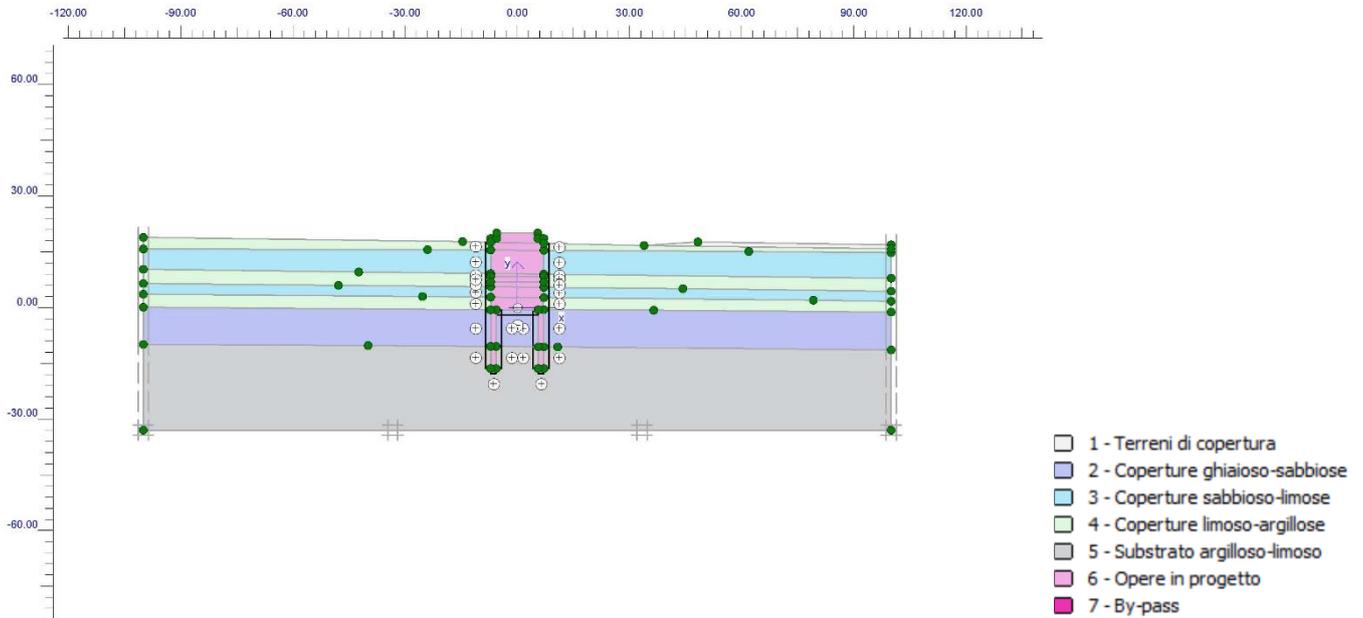


Figura 18 – Modello geologico utilizzato per l’analisi del flusso dopo la realizzazione dell’opera.

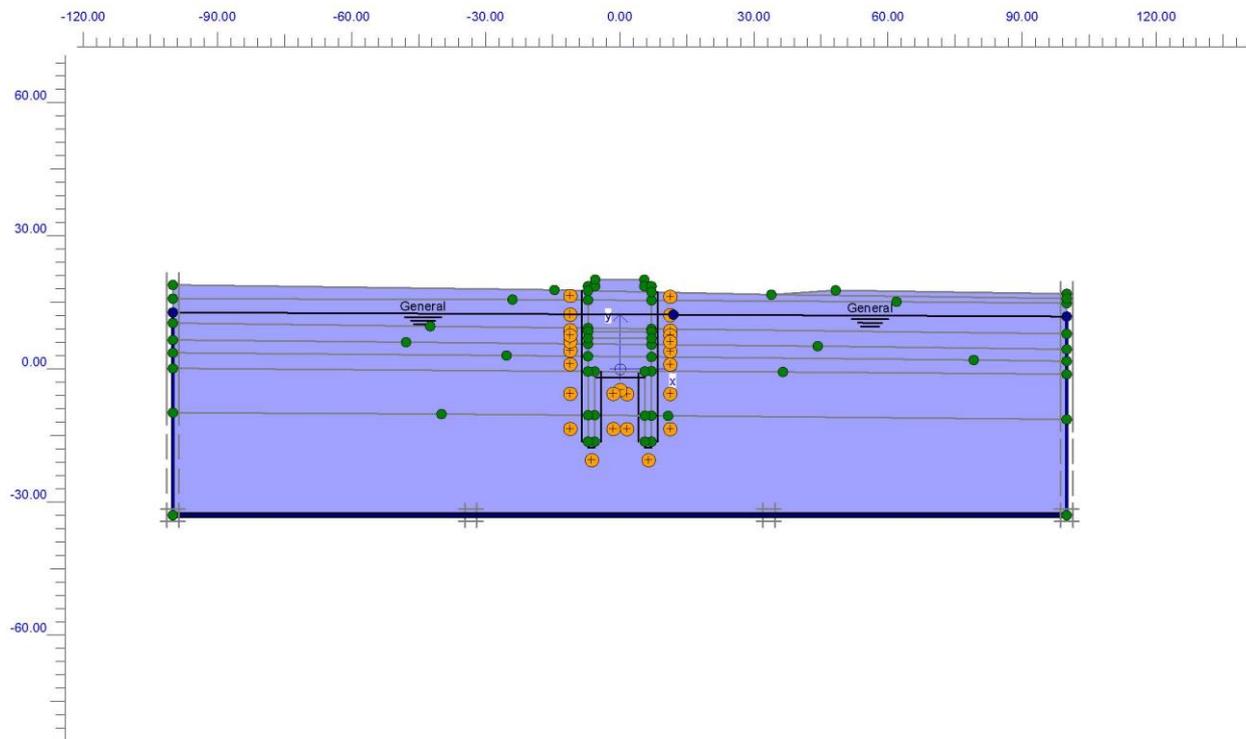


Figura 19 – Modello idrogeologico e livello di falda utilizzati per l’analisi del flusso dopo la realizzazione dell’opera.

Come visibile nel seguito (Figura 20, Figura 21, Figura 22, Figura 23), il modello riesce a simulare la variazione dello schema di circolazione idrica sotterranea a seguito della realizzazione dell’opera. In questa condizione, il

flusso dei due orizzonti sabbioso-limosi più superficiali e di quello ghiaioso-sabbioso più profondo viene completamente tamponato e indotto a passare al di sotto dell'opera, all'interno del substrato pelitico (Figura 20).

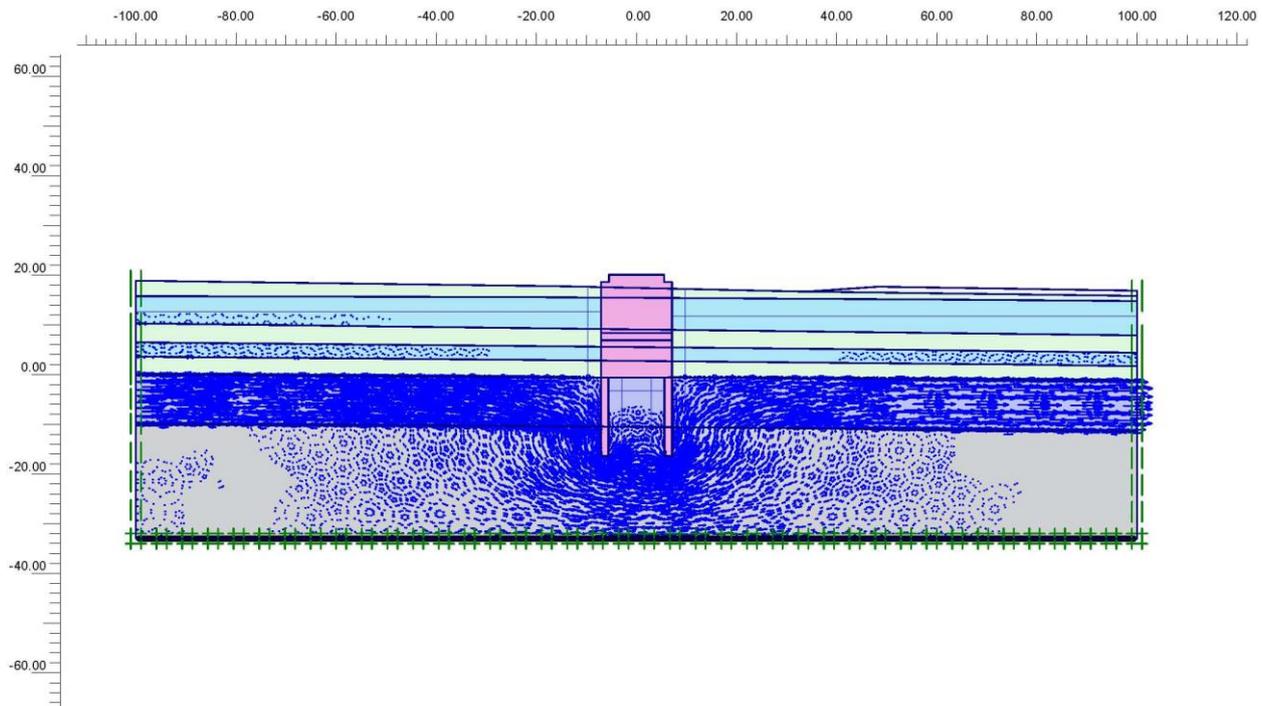


Figura 20 – Andamento dei vettori di flusso dopo la realizzazione dell'opera.

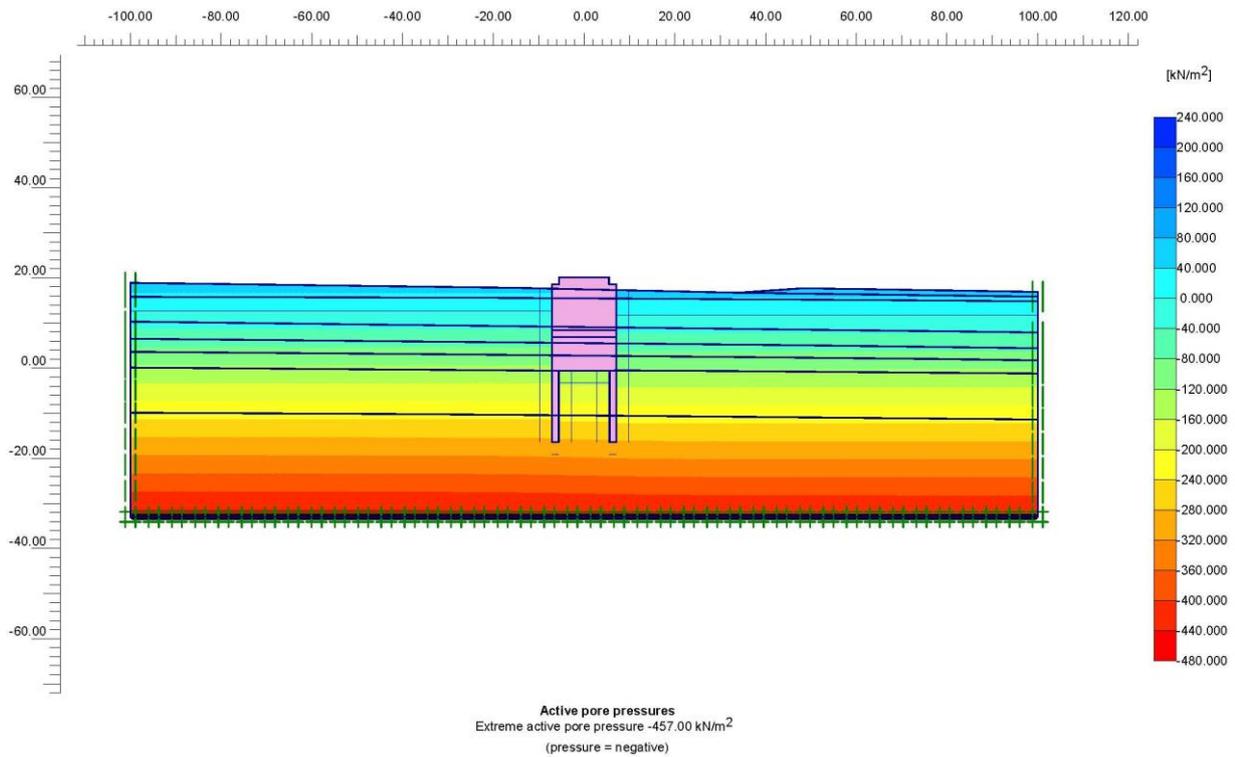
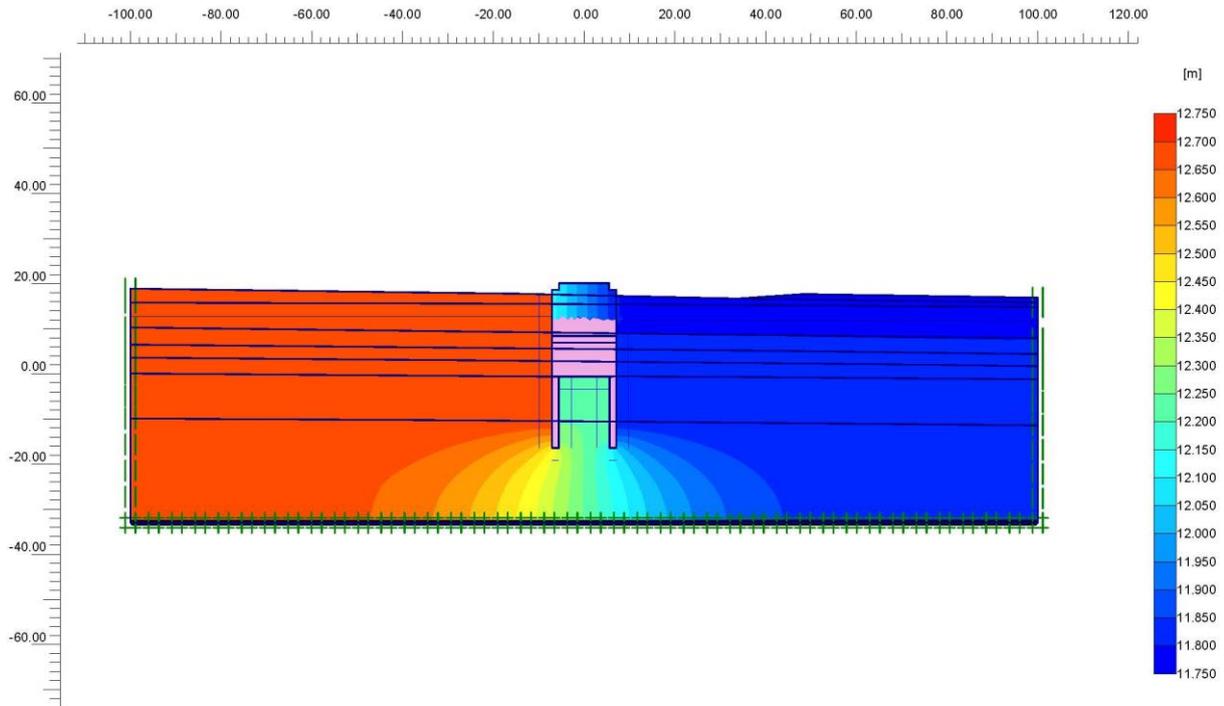


Figura 21 – Andamento delle pressioni interstiziali dopo la realizzazione dell'opera.



Active groundwater head
Extreme groundwater head 12.70 m

Figura 22 – Andamento delle linee equipotenziali dopo la realizzazione dell'opera.

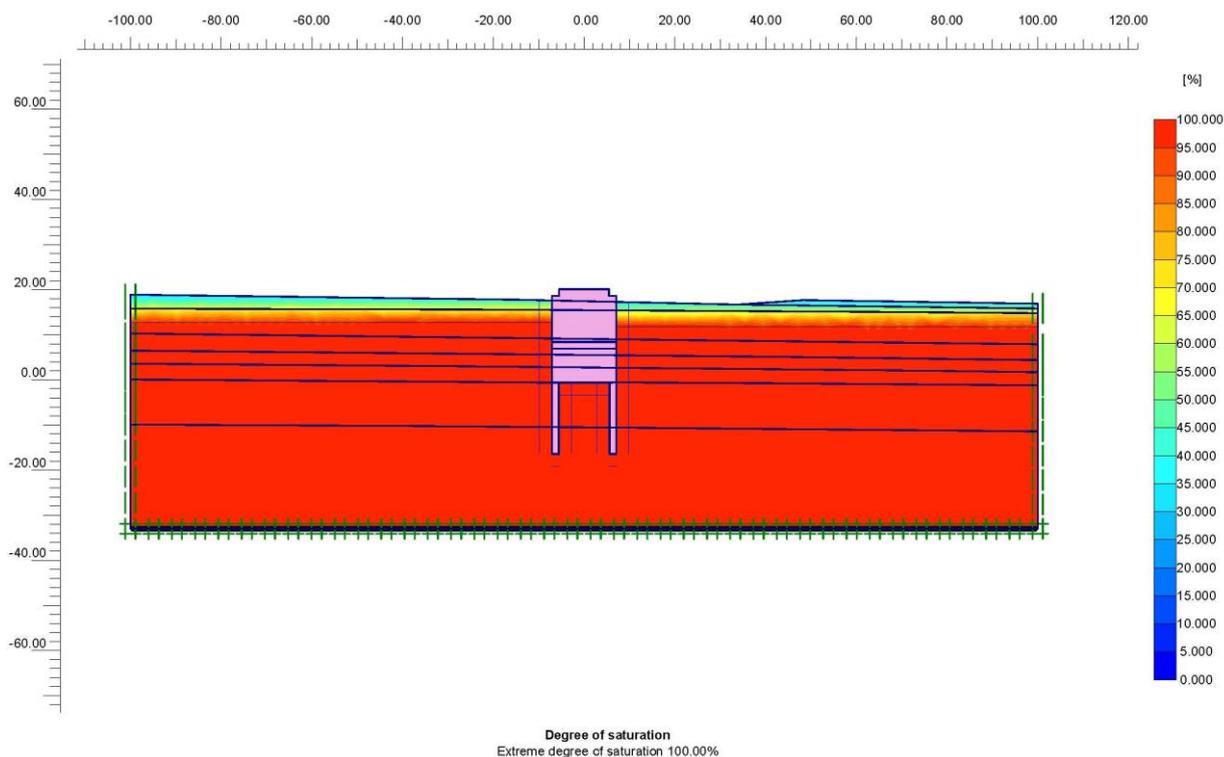


Figura 23 – Grado di saturazione dei terreni dopo la realizzazione dell’opera.

L’opera produce un completo sbarramento della falda presente nei depositi di copertura più superficiali. Il flusso viene deviato verso il substrato pelitico alla base dell’opera, che risulta caratterizzato da sottili orizzonti sabbiosi e sabbioso-limosi che permettono un deflusso, seppur lento, delle acque sotterranee. Nonostante ciò, la modesta permeabilità dei terreni di copertura interessati dalla realizzazione dell’opera e i limitati apporti idrici sotterranei che arrivano in corrispondenza della zona di sbarramento, fanno sì che le variazioni del livello piezometrico a seguito della realizzazione dell’opera risultino piuttosto basse e, comunque, nell’ordine di poche decine di centimetri, sia a monte che a valle.

Nella tabella seguente sono riportate le quote del livello di falda in corrispondenza dell’opera in progetto nelle condizioni iniziali e dopo la realizzazione degli interventi.

	Lato monte	Lato valle
Condizioni iniziali (quota in m s.l.m.)	12.28	12.23
Dopo la realizzazione dell’opera (quota in m s.l.m.)	12.70	11.90
Variazione (ΔH in m)	+0.42	-0.33

In particolare, sul lato di monte dell’opera il livello piezometrico aumenta di circa 0.42 m, passando dai 12.28 m s.l.m. della condizione iniziale a circa 12.70 m s.l.m. dopo la realizzazione dell’opera. Al contrario sul lato di valle il livello piezometrico diminuisce di circa 0.33 m, passando dai 12.23 m s.l.m. della condizione iniziale a circa 11.90 m s.l.m. dopo la realizzazione dell’opera.

4.2 Sezione 2

La **sezione 2** è caratterizzata da una galleria artificiale a due binari, con piano ferro posto a circa 4.60 m s.l.m.. La larghezza dell'opera è di circa 14.2 m, mentre la profondità massima di circa 31.8 m.

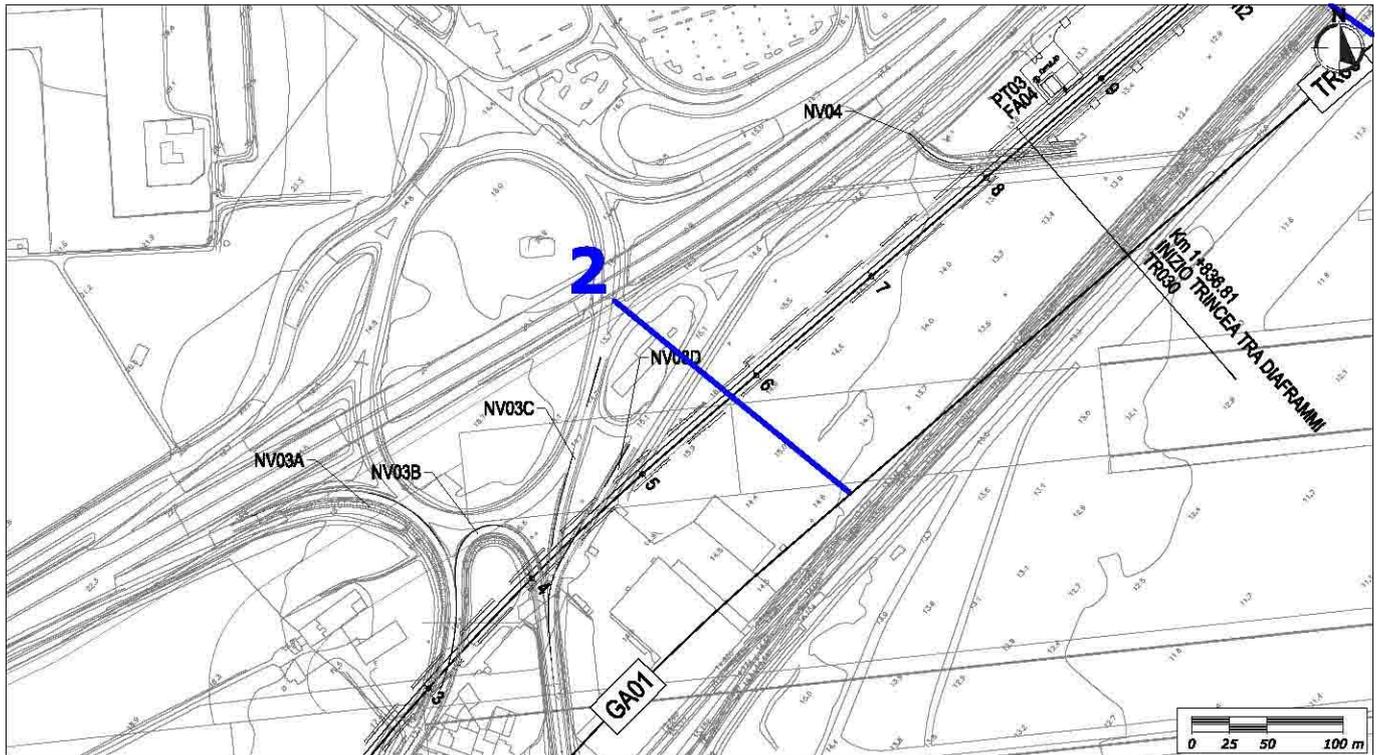


Figura 24 - Stralcio cartografico di ubicazione della traccia della Sezione 2 (in blu), con indicazione del tracciato di progetto (in nero).

Il modello prevede un dominio di studio con una profondità di circa 50 m (poco meno di 2 volte la profondità dell'opera) ed una larghezza di 200 m (circa 14 volte la larghezza dell'opera).

La quota del piano campagna è variabile tra 19.2 m s.l.m. e 13.9 m s.l.m., con una pendenza media di circa 0.05% (0.03°).

In corrispondenza dei bordi del modello la falda è ubicata a quota $h_{sx} = 13.38$ m s.l.m. ($x = -100.0$ m) e $h_{dx} = 12.05$ m s.l.m. ($x = +100.0$ m), con un dislivello totale $\Delta H = 1.33$ m e una pendenza di circa 0.67% (0.38°). In questo caso, i gradienti piezometrici risultano bassi ma comunque sufficienti al corretto svolgimento delle analisi numeriche.

In corrispondenza dell'opera, la falda è posta a quota $h_{sx} = 13.02$ m s.l.m. lato monte e $h_{dx} = 12.93$ m s.l.m. lato valle. La quota piezometrica risulta quindi leggermente superiore alla testa dell'opera, che risulta sormontata dalla falda di pochi centimetri.

4.2.1 Flusso nella condizione iniziale

Inizialmente è stato analizzato il flusso nella condizione attuale, prima della realizzazione dell'opera (Figura 25). L'area è caratterizzata da un'alternanza di orizzonti sabbioso-limosi e limoso-argillosi, continui e con spessori di

qualche metro. Tali terreni di copertura poggiano su un substrato prevalentemente pelitico e poco permeabile, con tetto posto a profondità variabili tra i 16.4 e 20.8 m dal p.c..

Stante la relativa semplicità del modello e il ridotto numero di orizzonti litologici, in fase di analisi sono stati considerati separatamente tutti i diversi strati di terreno presenti nell'area.

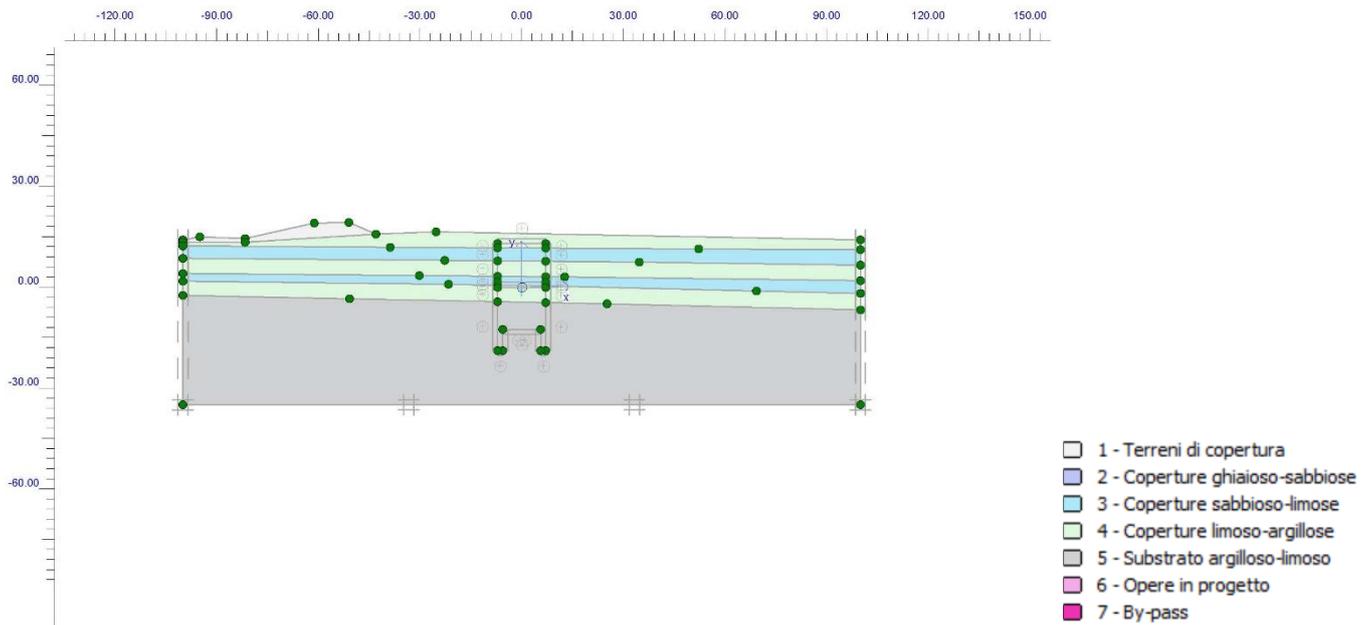


Figura 25 – Modello geologico utilizzato per l'analisi del flusso nella condizione iniziale.

Dal punto di vista idrogeologico, la falda nella condizione iniziale è stata ricostruita secondo i criteri descritti in precedenza (Figura 26).

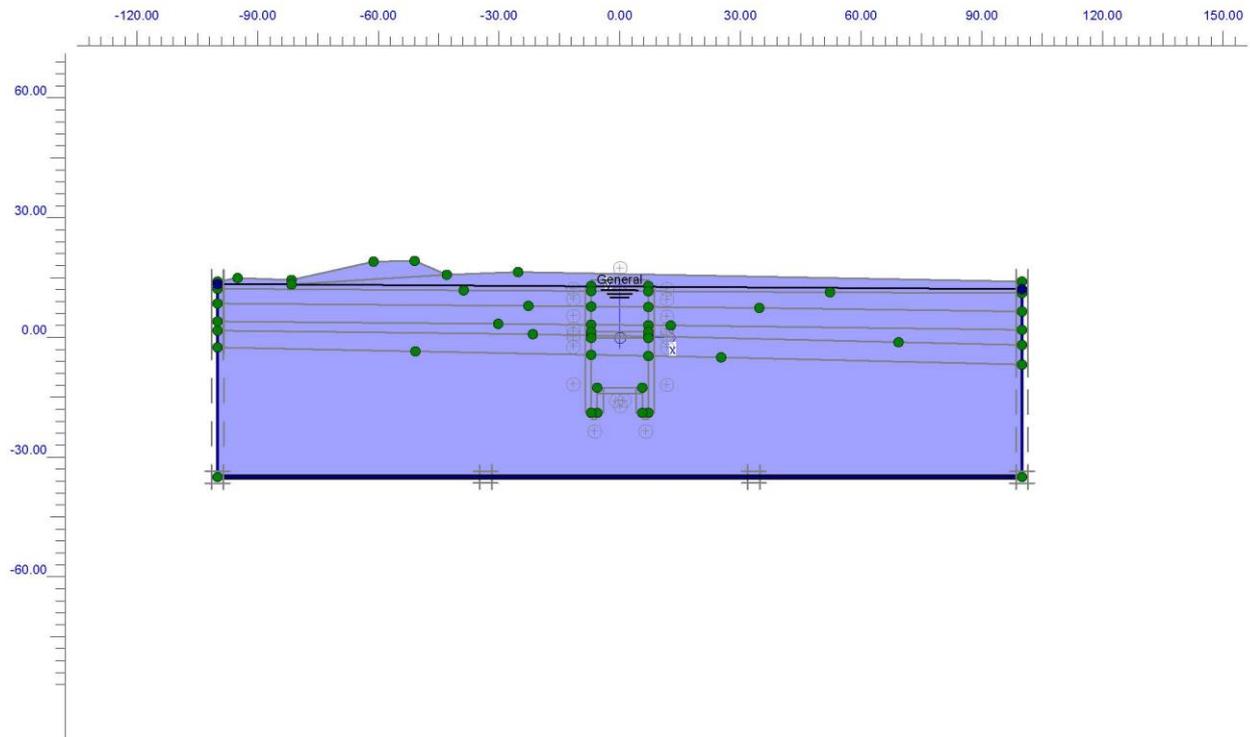
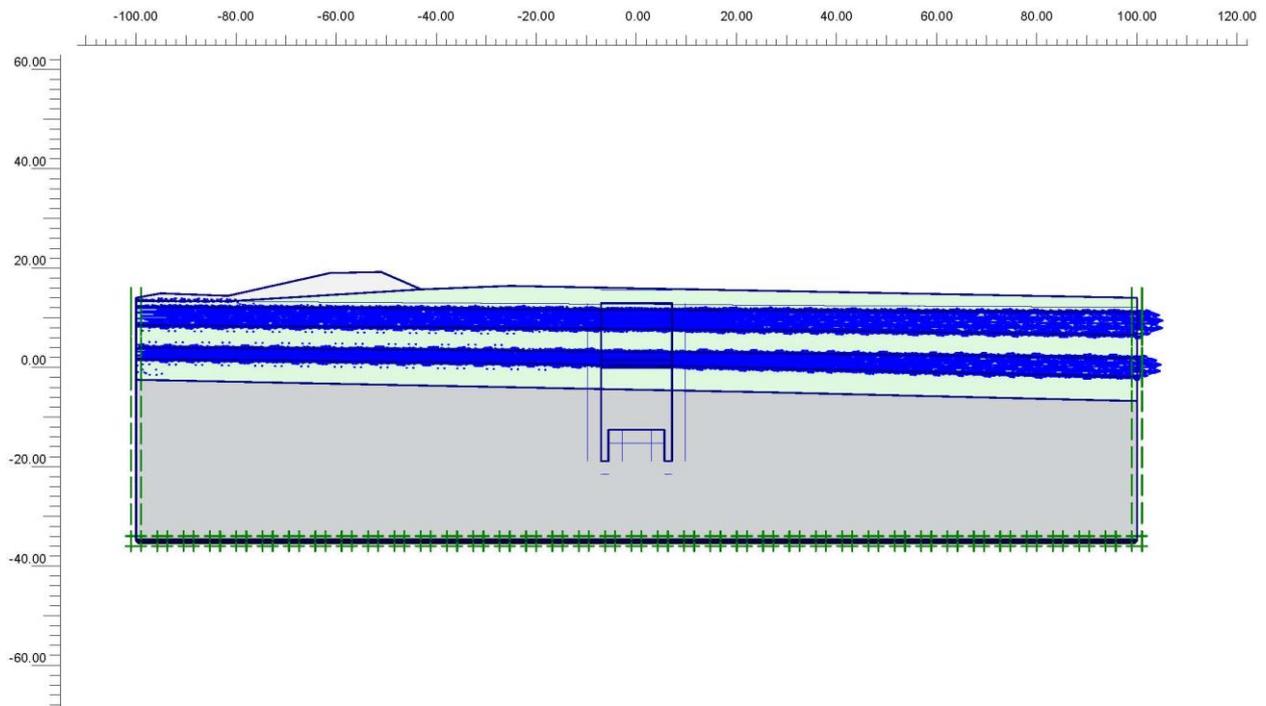


Figura 26 – Modello idrogeologico e livello di falda utilizzati per l’analisi del flusso nella condizione iniziale.

Come visibile nel seguito (Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30), il modello riesce a simulare il livello di falda definito in base al monitoraggio piezometrico. Il deflusso avviene principalmente in corrispondenza dei due orizzonti sabbioso-limosi più superficiali e permeabili (Figura 27), mentre solo una piccola parte del deflusso idrico sotterraneo si verifica all’interno degli orizzonti pelitici a bassa permeabilità.



Flow Field
Extreme velocity $385.24 \cdot 10^{-9}$ m/s

Figura 27 – Andamento dei vettori di flusso nella condizione iniziale.

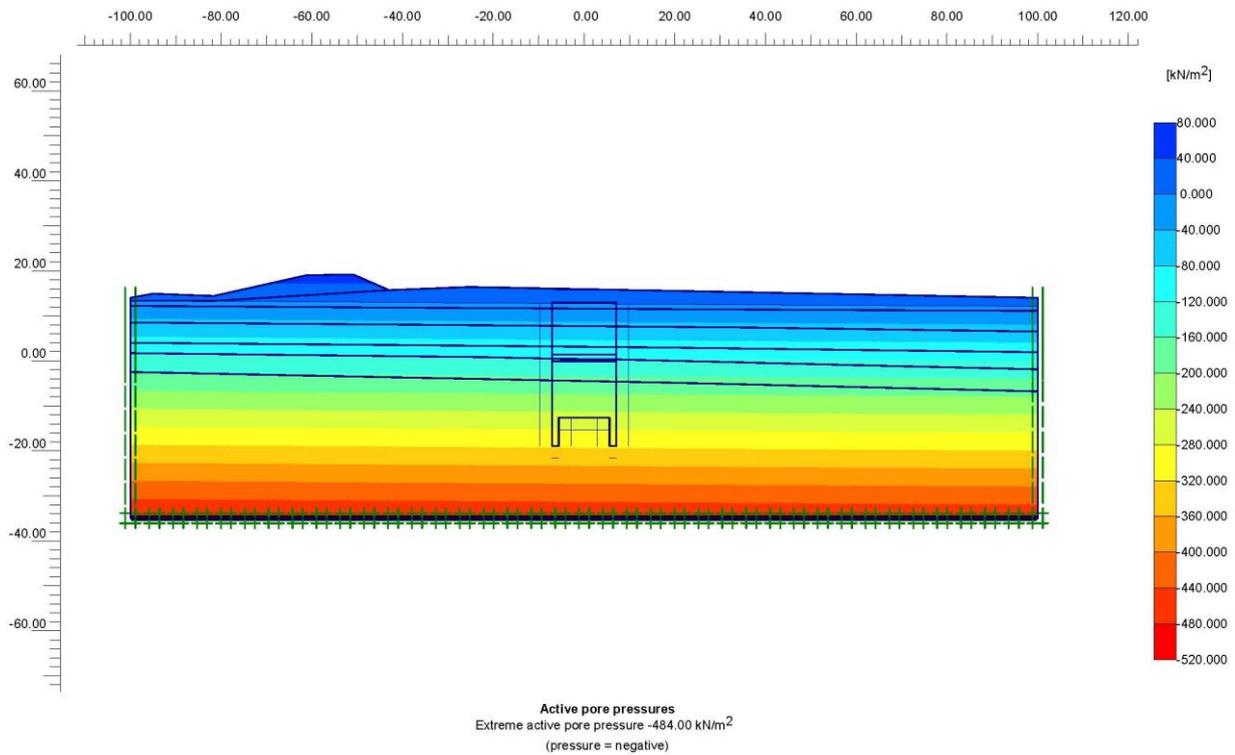


Figura 28 – Andamento delle pressioni interstiziali nella condizione iniziale.

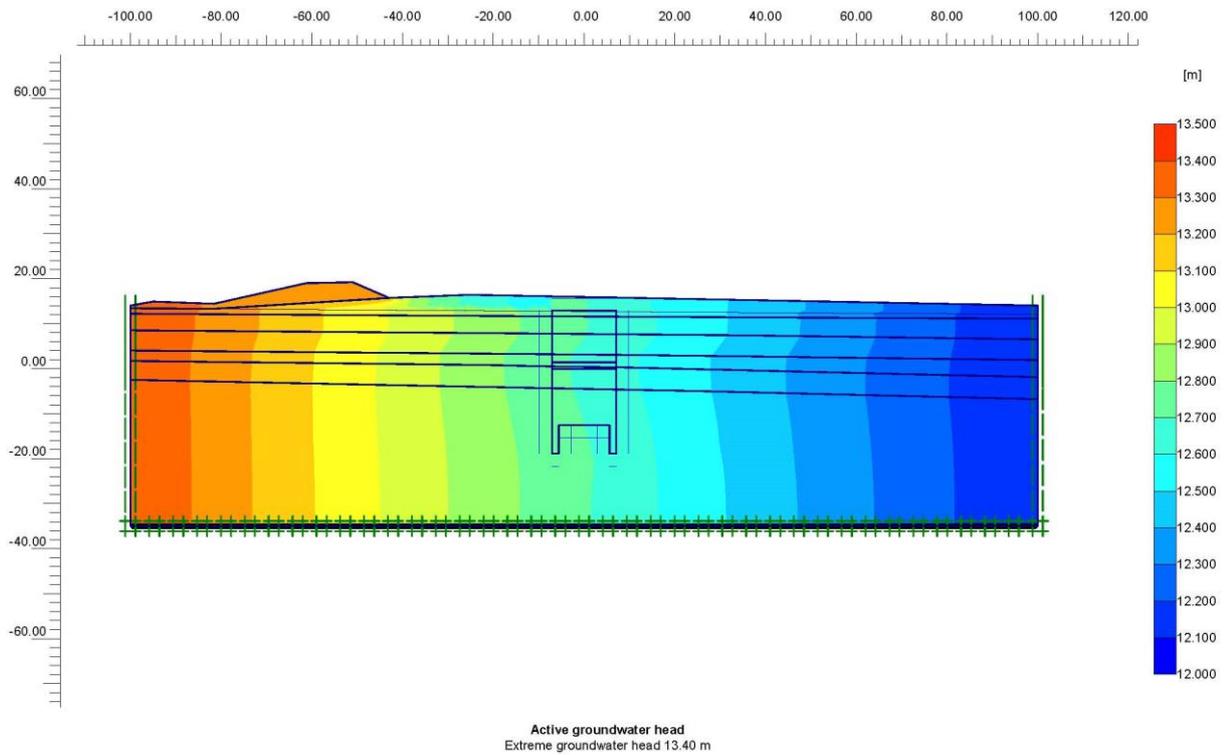


Figura 29 – Andamento delle linee equipotenziali nella condizione iniziale.

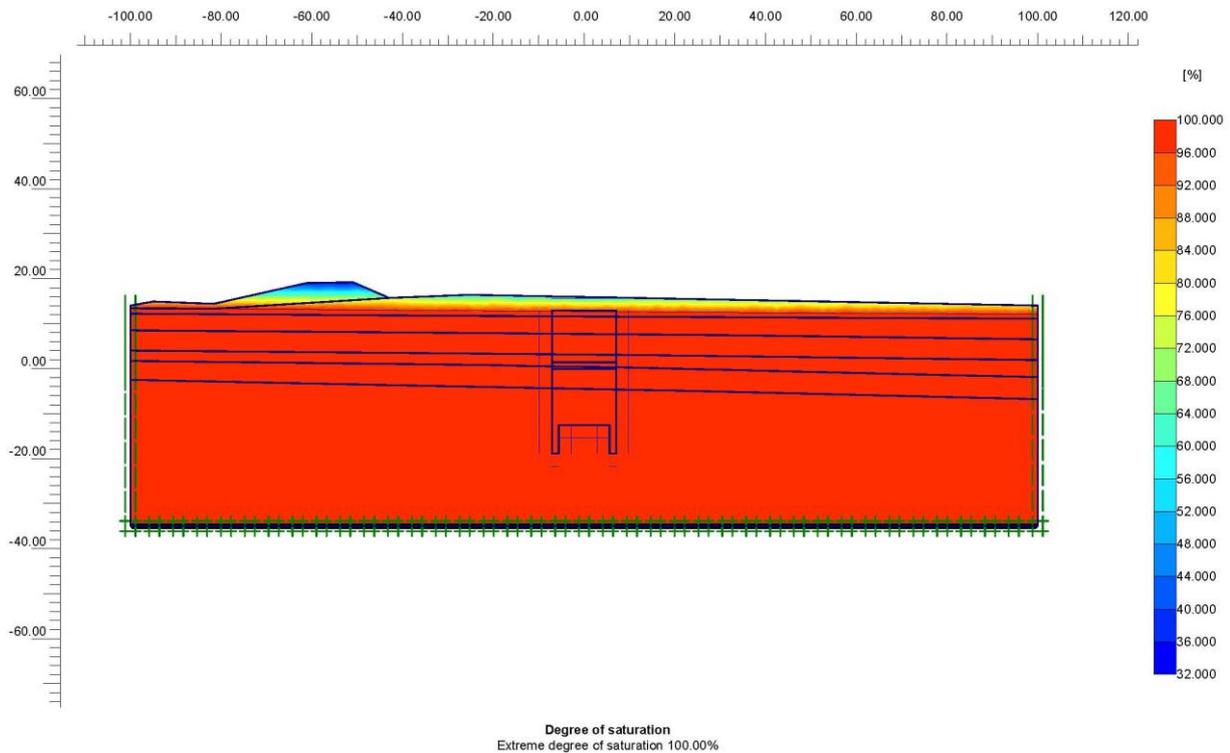


Figura 30 – Grado di saturazione dei terreni nella condizione iniziale.

4.2.2 *Flusso dopo la realizzazione dell'opera*

Al fine di valutare l'interferenza prodotta dagli interventi in progetto sul regime di deflusso idrico sotterraneo dell'area, nel modello iniziale è stata inserita l'opera in esame (Figura 31; Figura 32). Come nel caso precedente, l'opera è costituita da un mezzo non poroso e praticamente impermeabile.

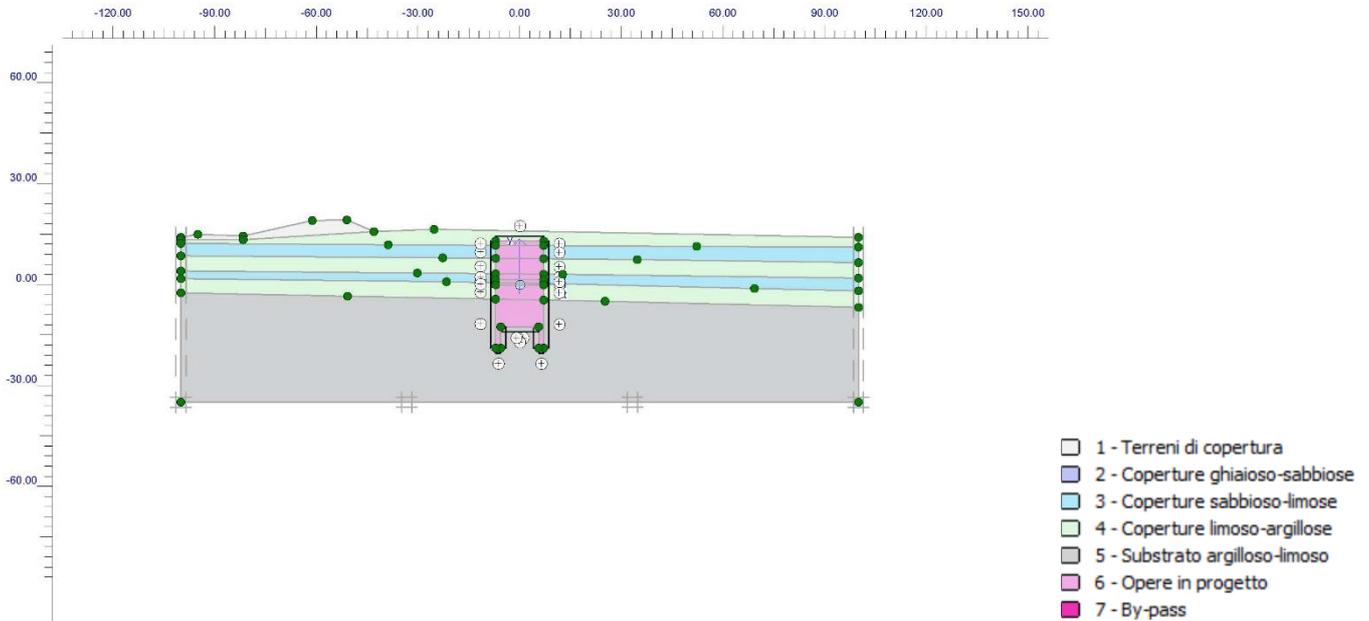


Figura 31 – Modello geologico utilizzato per l’analisi del flusso dopo la realizzazione dell’opera.

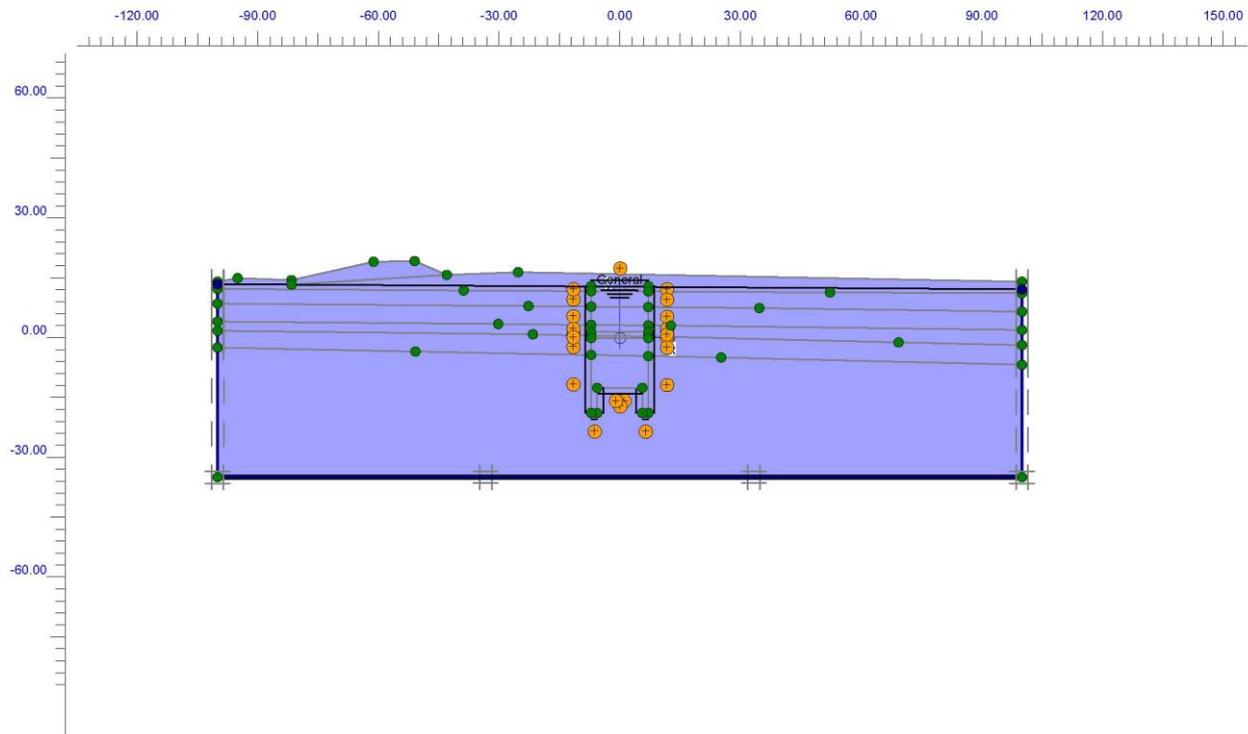


Figura 32 – Modello idrogeologico e livello di falda utilizzati per l’analisi del flusso dopo la realizzazione dell’opera.

Come visibile dalle immagini seguenti (Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36), il modello prodotto simula efficacemente la variazione dello schema di circolazione idrica sotterranea prodotto dalla realizzazione dell’opera.

In questo caso, il flusso dei due orizzonti sabbioso-limosi più superficiali viene quasi completamente tamponato dagli interventi in progetto. Il deflusso dell'orizzonte più superficiale viene spinto al di sopra dell'opera, che risulta completamente sormontata, mentre quello dell'orizzonte sabbioso-limoso più profondo viene forzato a passare al di sotto della barriera idraulica, all'interno del substrato pelitico (Figura 33).

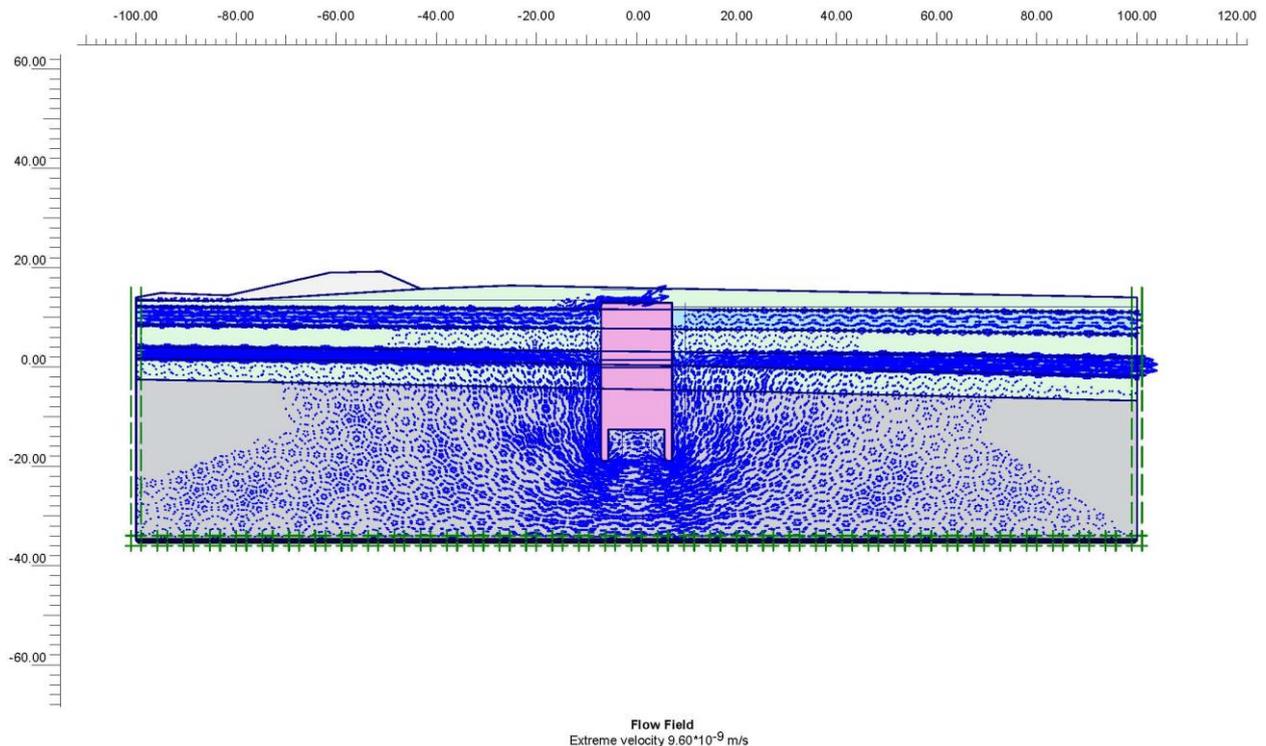


Figura 33 – Andamento dei vettori di flusso dopo la realizzazione dell'opera.

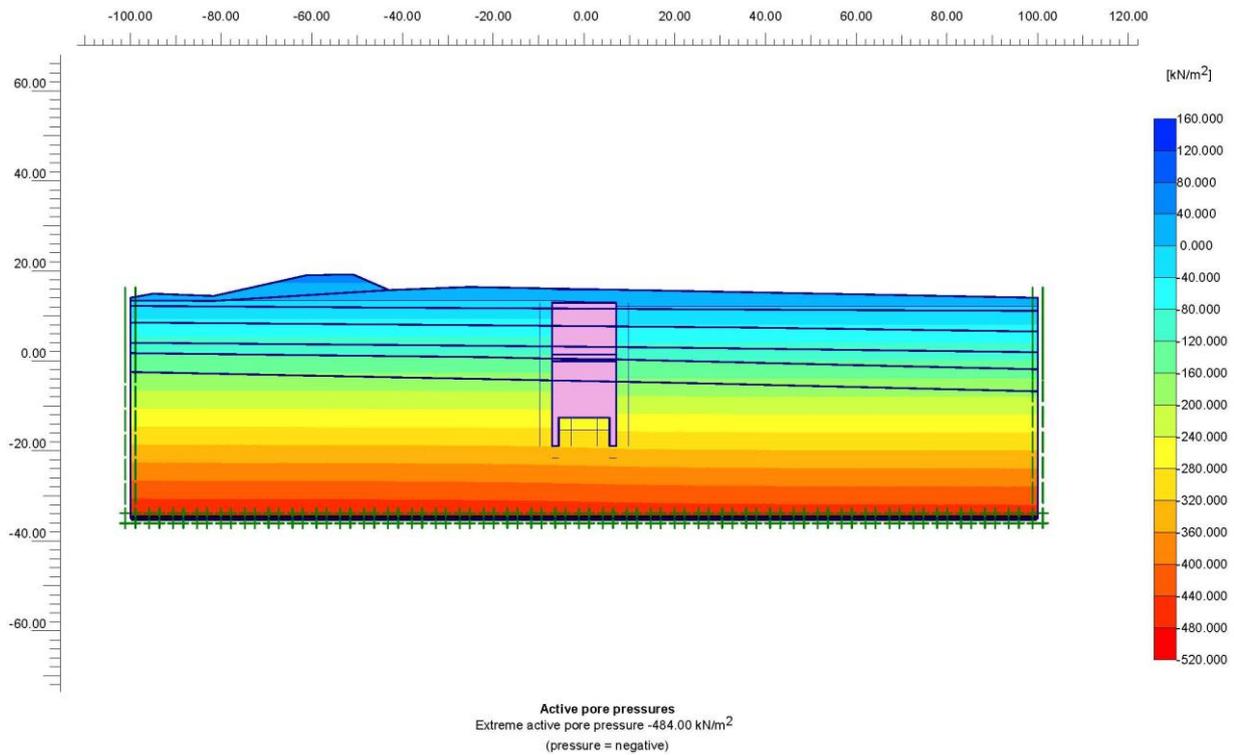


Figura 34 – Andamento delle pressioni interstiziali dopo la realizzazione dell'opera.

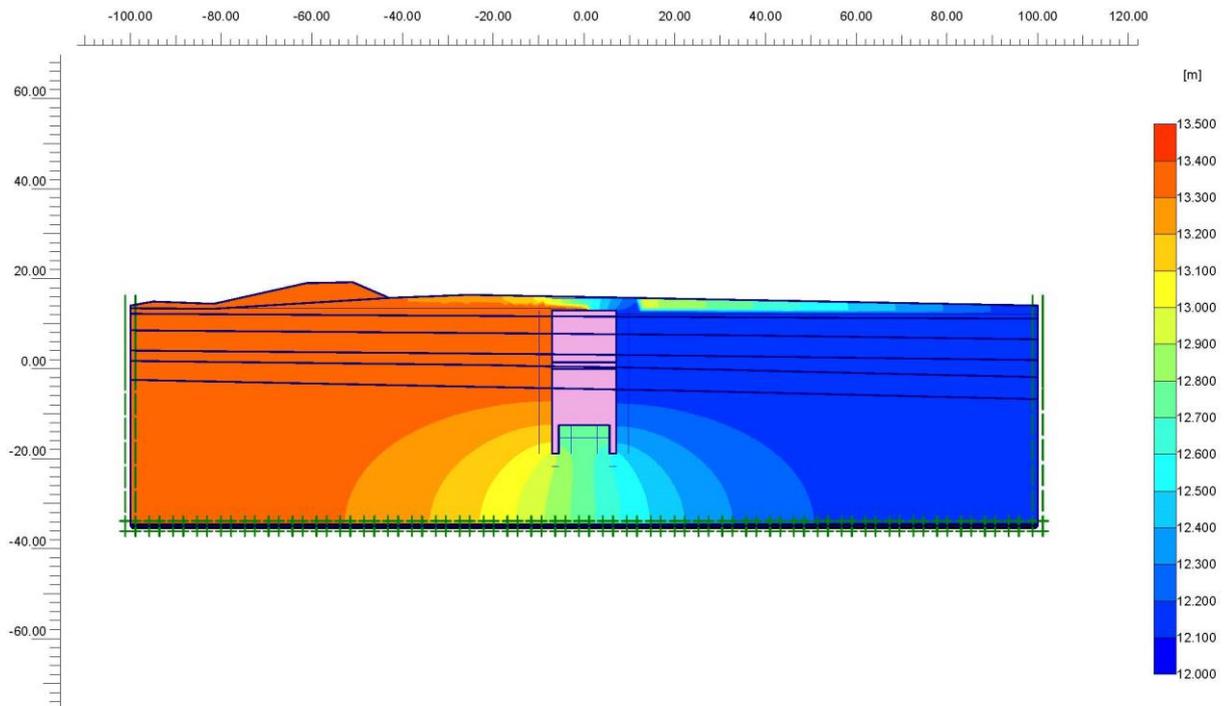


Figura 35 – Andamento delle linee equipotenziali dopo la realizzazione dell'opera.

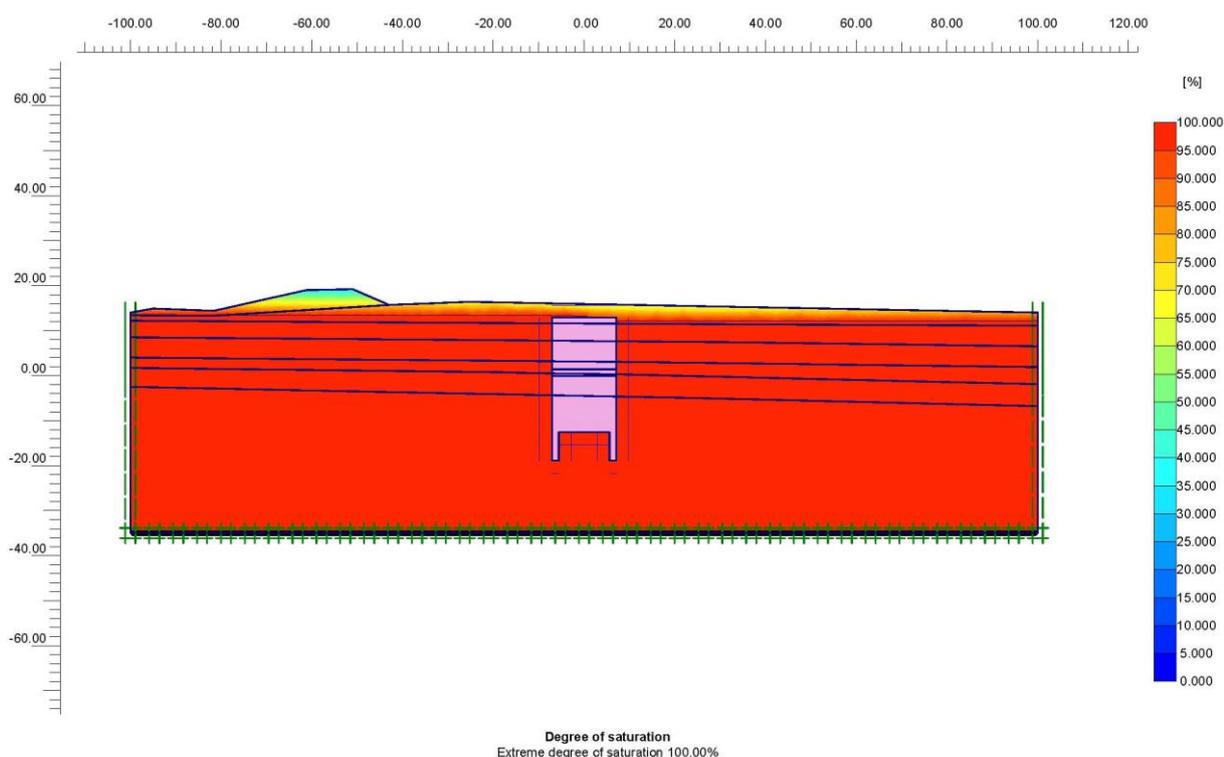


Figura 36 – Grado di saturazione dei terreni dopo la realizzazione dell’opera.

Pertanto, l’opera in progetto determina lo sbarramento del deflusso idrico sotterraneo dell’area di intervento, che viene deviato in parte al di sopra dell’opera e in parte al di sotto stessa. Ad ogni modo, la modesta permeabilità degli orizzonti psammitici, i limitati apporti idrici sotterranei e la ridotta differenza di permeabilità tra i diversi strati di terreno, fanno sì che buona parte del flusso venga deviato verso gli orizzonti meno permeabili del substrato pelitico presente alla base dell’opera, producendo solo limitate variazioni della superficie piezometrica. In particolare, si evidenzia un leggero innalzamento del livello di falda a monte dell’opera, che viene completamente sormontata dal deflusso delle acque sotterranee.

Nella tabella seguente sono riportate le quote del livello di falda in corrispondenza dell’opera in progetto nelle condizioni iniziali e dopo la realizzazione degli interventi.

	Lato monte	Lato valle
Condizioni iniziali (quota in m s.l.m.)	13.02	12.93
Dopo la realizzazione dell’opera (quota in m s.l.m.)	13.40	12.20
Variazione (ΔH in m)	+0.38	-0.73

In particolare, sul lato di monte dell’opera il livello piezometrico aumenta di circa 0.38 m, passando dai 13.02 m s.l.m. della condizione iniziale a circa 13.40 m s.l.m. dopo la realizzazione dell’opera. Al contrario sul lato di valle il livello piezometrico diminuisce di circa 0.73 m, passando dai 12.93 m s.l.m. della condizione iniziale a circa 12.20 m s.l.m. dopo la realizzazione dell’opera.

4.2.3 Flusso con la realizzazione del by-pass

Le variazioni del livello di falda prodotte dalla realizzazione dell'opera, seppur non particolarmente elevate, risultano incompatibili col contesto in cui si inserisce l'opera, sia per la presenza di strutture antropiche che per la ridotta profondità della superficie piezometrica rispetto al piano campagna. Per tale motivo, in questa sezione è stata prevista la realizzazione di un by-pass idraulico per minimizzare gli effetti di variazione del deflusso idrico sotterraneo prodotti dall'opera.

Per poter analizzare l'influenza del by-pass nel regime di circolazione idrica dell'area, nel modello è stato inserito un elemento ad elevata permeabilità all'interno dell'opera (Figura 37; Figura 38). Come nel caso precedente, l'opera è costituita da un mezzo non poroso e praticamente impermeabile.

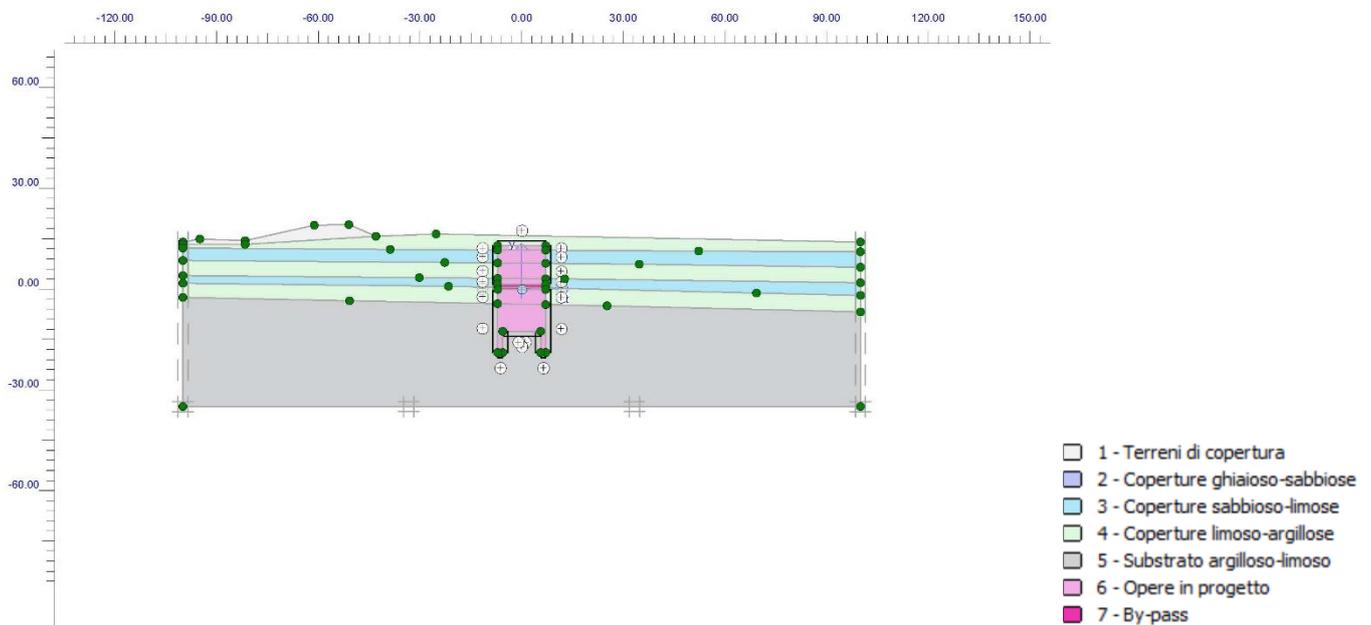


Figura 37 – Modello geologico utilizzato per l'analisi del flusso con la realizzazione del by-pass.

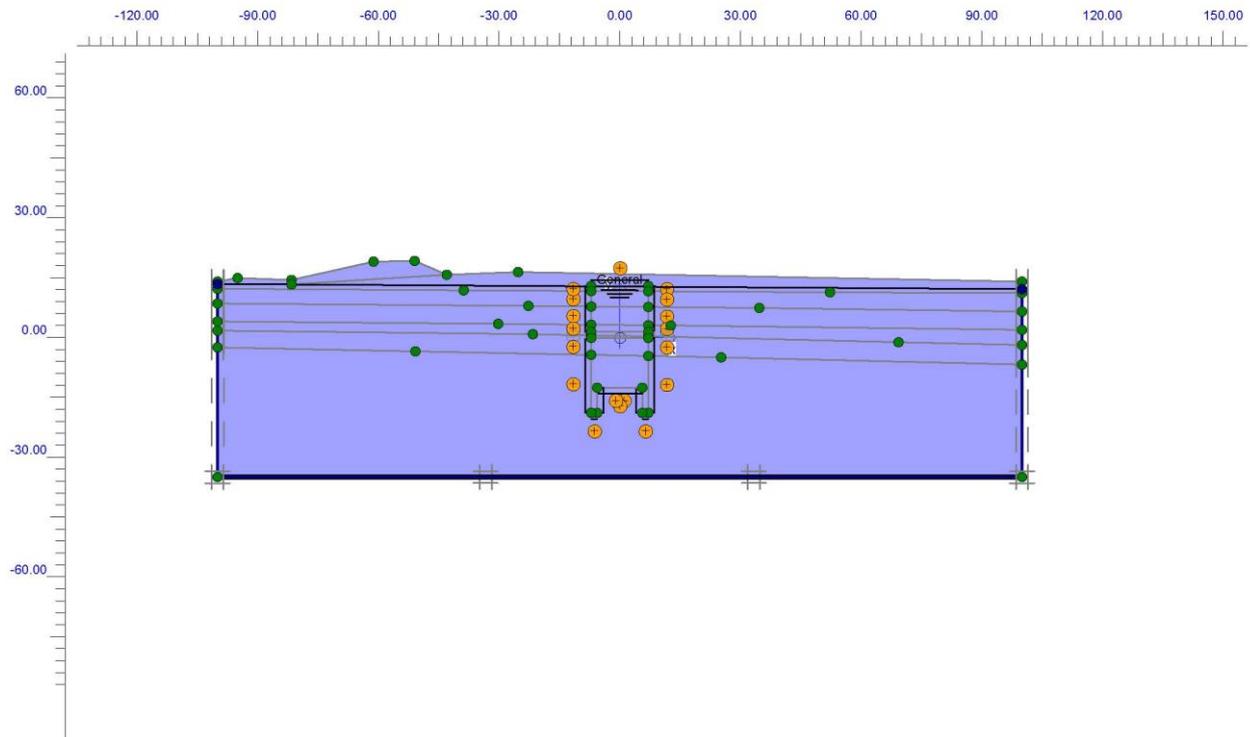


Figura 38 – Modello idrogeologico e livello di falda utilizzati per l'analisi del flusso con la realizzazione del by-pass.

Come visibile dalle immagini seguenti (Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 42), il modello prodotto simula efficacemente la variazione dello schema di circolazione idrica sotterranea prodotto dalla realizzazione dell'opera e dall'inserimento del by-pass. In questo caso, il flusso dell'orizzonte sabbioso-limoso più superficiale viene completamente tamponato dagli interventi in progetto, mentre quello dell'orizzonte più profondo viene in buona parte ristabilito dalla presenza del by-pass (Figura 39).

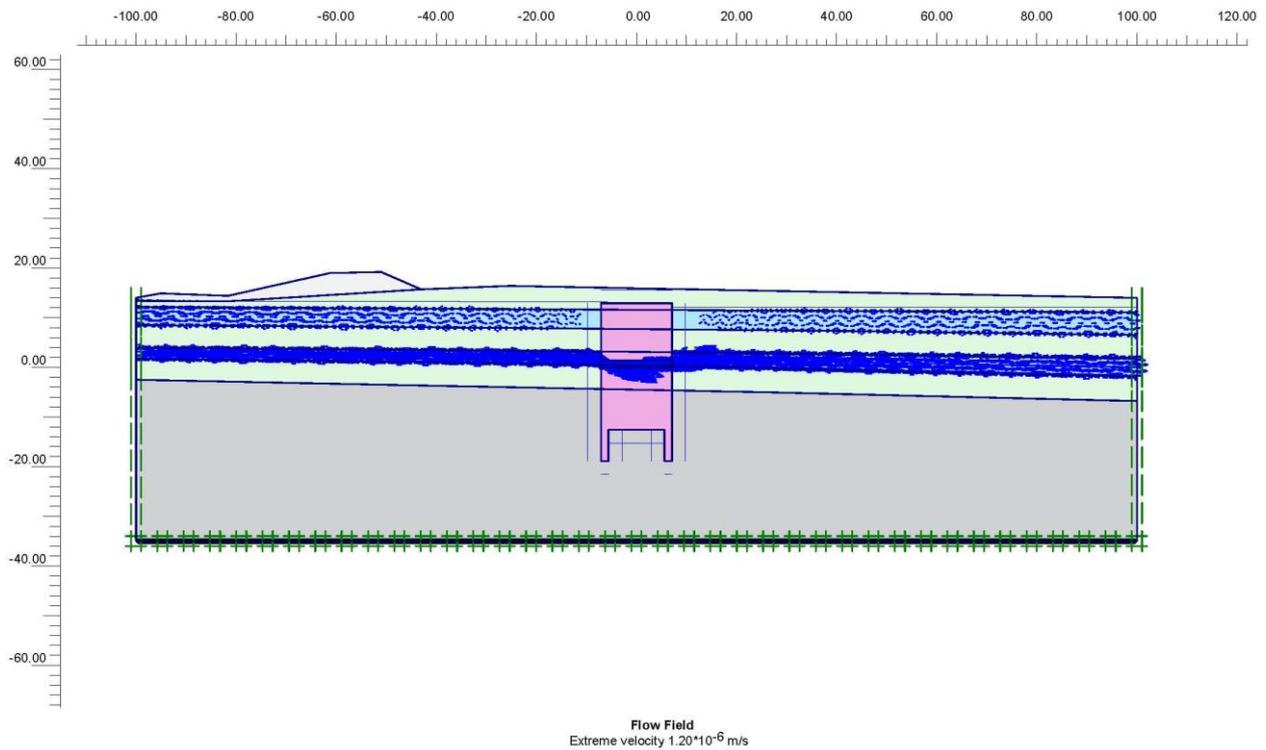


Figura 39 – Andamento dei vettori di flusso con la realizzazione del by-pass.

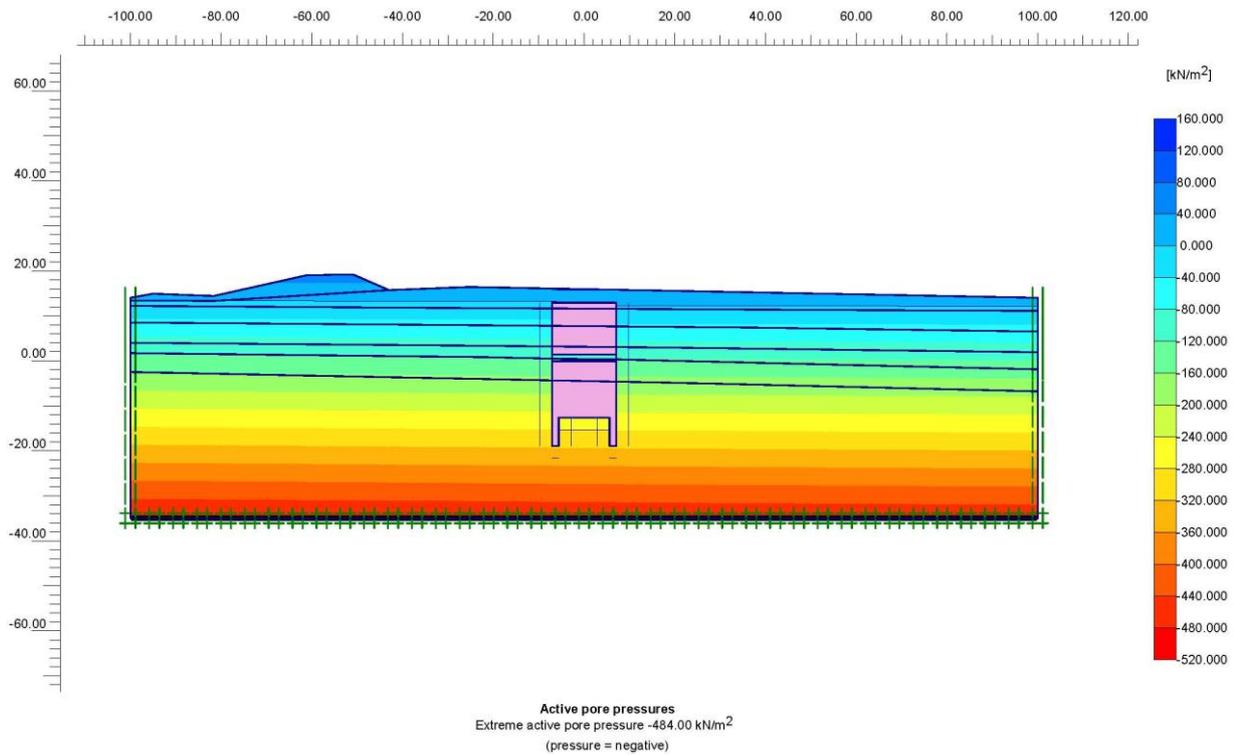


Figura 40 – Andamento delle pressioni interstiziali con la realizzazione del by-pass.

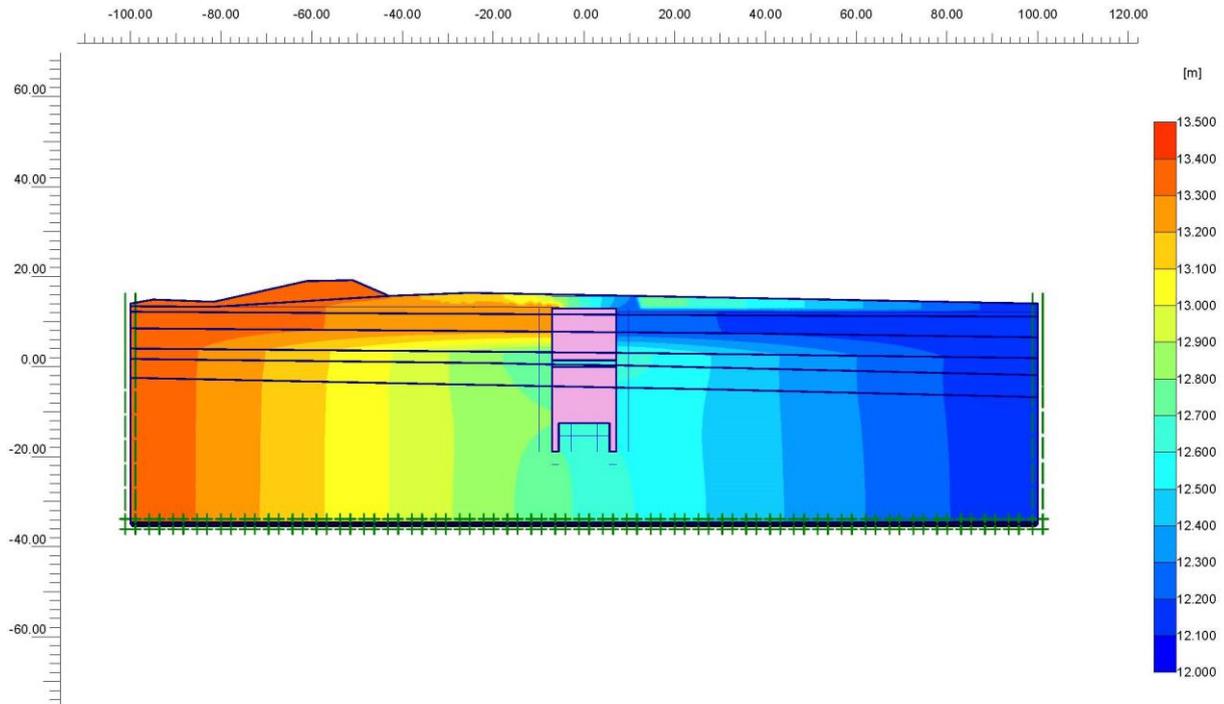


Figura 41 – Andamento delle linee equipotenziali con la realizzazione del by-pass.

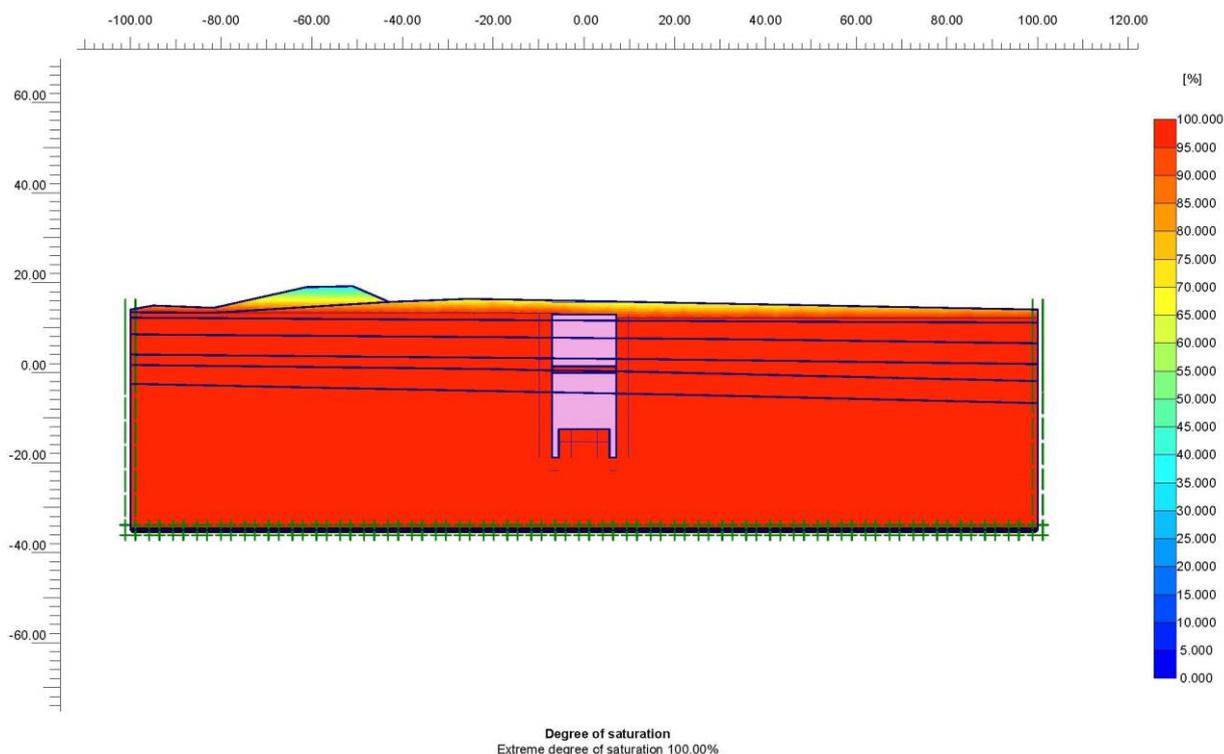


Figura 42 – Grado di saturazione dei terreni con la realizzazione del by-pass.

L'inserimento del by-pass idraulico consente il raccordo tra i corpi idrici presenti a monte dell'opera e quelli a valle. Nonostante l'orizzonte permeabile più superficiale risulti completamente tamponato dallo sbarramento, il flusso dell'orizzonte sabbioso-limoso più profondo viene messo in buona parte ristabilito dall'opera. Nonostante rimangano innalzamenti della falda a monte dell'opera e abbassamenti a valle della stessa, il by-pass consente di minimizzare tali effetti, riducendo sensibilmente le variazioni indotte.

Nella tabella seguente sono riportate le quote del livello di falda in corrispondenza dell'opera in progetto nelle condizioni iniziali e dopo la realizzazione del by-pass.

	Lato monte	Lato valle
Condizioni iniziali (quota in m s.l.m.)	13.02	12.93
Dopo la realizzazione dell'opera (quota in m s.l.m.)	13.20	12.30
Variazione (ΔH in m)	+0.18	-0.63

A seguito dell'inserimento del by-pass, sul lato di monte dell'opera il livello piezometrico aumenta di soli 0.18 m, passando dai 13.02 m s.l.m. della condizione iniziale a circa 13.20 m s.l.m. dopo la realizzazione del by-pass. Al contrario sul lato di valle il livello piezometrico diminuisce di circa 0.63 m, passando dai 12.93 m s.l.m. della condizione iniziale a circa 12.30 m s.l.m. dopo la realizzazione dell'opera.

Confrontando questi dati con quelli dell'opera senza by-pass, si nota come l'inserimento di un elemento ad elevata permeabilità consenta di ridurre le variazioni della superficie piezometrica prodotte dalla realizzazione dell'opera. A monte, il by-pass permette di ridurre di circa 0.20 m l'innalzamento della falda, mentre a valle consente di ridurre di circa 0.10 m gli abbassamenti della stessa.

4.3 Sezione 3

La **sezione 3** è caratterizzata da una trincea a due binari, con piano ferro posto a circa 9.30 m s.l.m.. La larghezza dell'opera è di circa 14.2 m, mentre la profondità massima di circa 35.0 m.

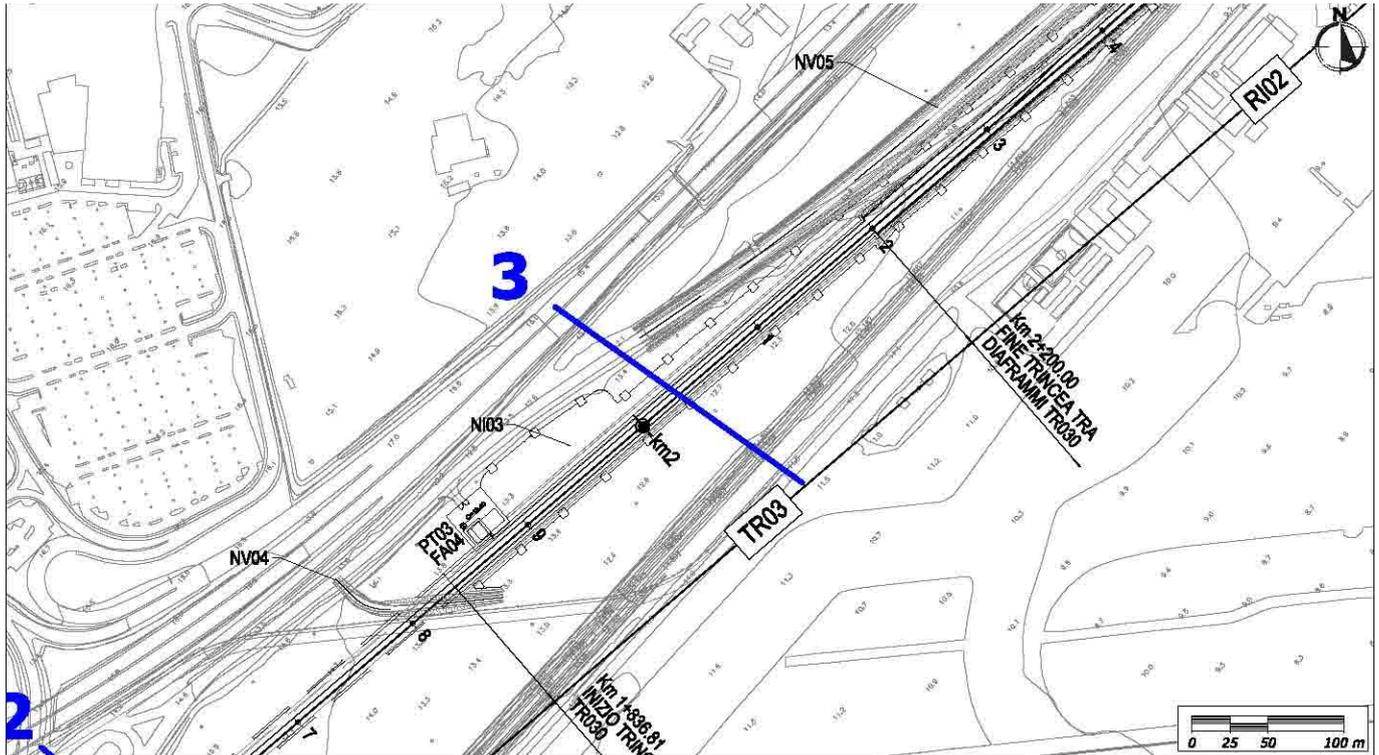


Figura 43 - Stralcio cartografico di ubicazione della traccia della Sezione 3 (in blu), con indicazione del tracciato di progetto (in nero).

Il modello prevede un dominio di studio con una profondità di circa 50 m (poco meno di 2 volte la profondità dell'opera) ed una larghezza di 200 m (circa 14 volte la larghezza dell'opera).

La quota del piano campagna è variabile tra 15.6 m s.l.m. e 11.5 m s.l.m., con una pendenza media di circa 2.05% (1.17°).

In corrispondenza dei bordi del modello la falda è ubicata a quota $h_{sx} = 11.01$ m s.l.m. ($x = -100.0$ m) e $h_{dx} = 9.71$ m s.l.m. ($x = +100.0$ m), con un dislivello totale $\Delta H = 1.30$ m e una pendenza di circa 0.65% (0.37°). In questo caso, i gradienti piezometrici risultano bassi ma comunque sufficienti al corretto svolgimento delle analisi numeriche.

In corrispondenza dell'opera, la falda è posta a quota $h_{sx} = 10.34$ m s.l.m. lato monte e $h_{dx} = 10.25$ m s.l.m. lato valle.

4.3.1 Flusso nella condizione iniziale

Nella prima fase è stato analizzato il flusso nella condizione attuale, prima della realizzazione dell'opera (Figura 44). L'area è caratterizzata da spessi depositi sabbioso-limosi localmente intervallati da orizzonti limoso-argillosi di discreto spessore. Nella parte bassa, immediatamente al di sopra del substrato pelitico poco permeabile, la

copertura alluvionale presenta una lente di ghiaie e sabbie che si inspessisce verso la costa, fino a raggiungere la potenza di circa 2.5 m verso il bordo destro del modello.

Stante la relativa semplicità del modello e il ridotto numero di orizzonti litologici, in fase di analisi sono stati considerati separatamente tutti i diversi strati di terreno presenti nell'area.

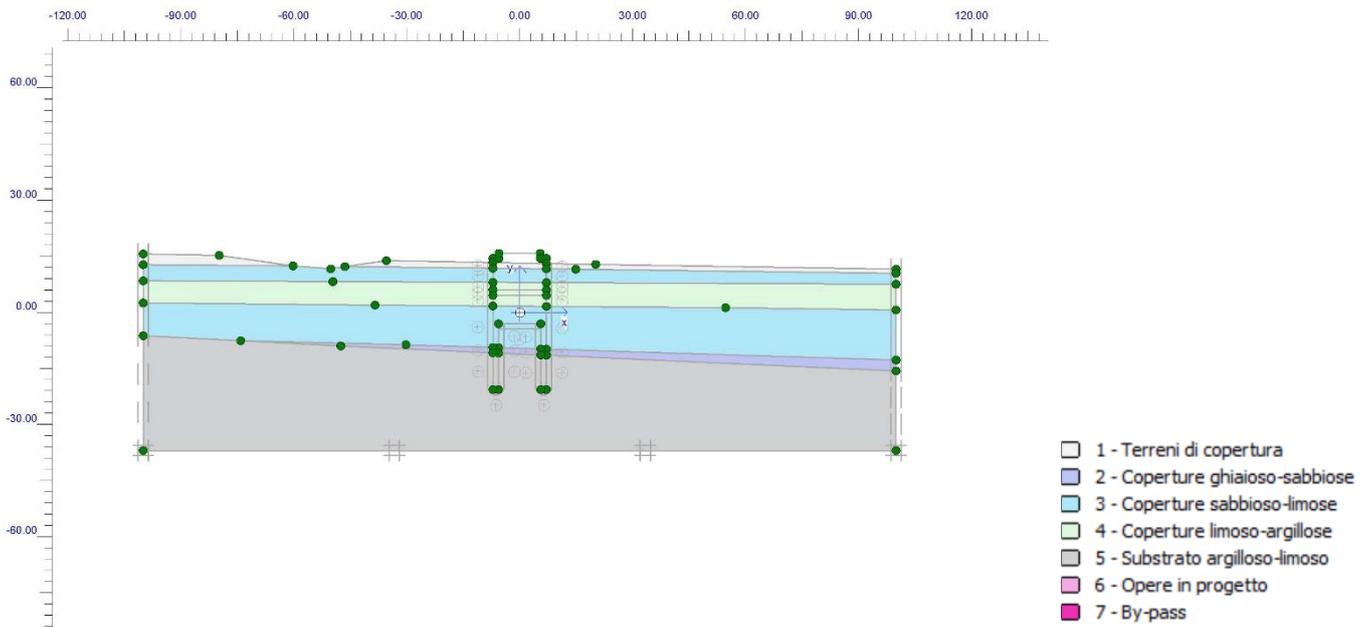


Figura 44 – Modello geologico utilizzato per l'analisi del flusso nella condizione iniziale.

Sotto il profilo idrogeologico, la falda nella condizione iniziale è stata ricostruita secondo i criteri precedentemente descritti (Figura 45).

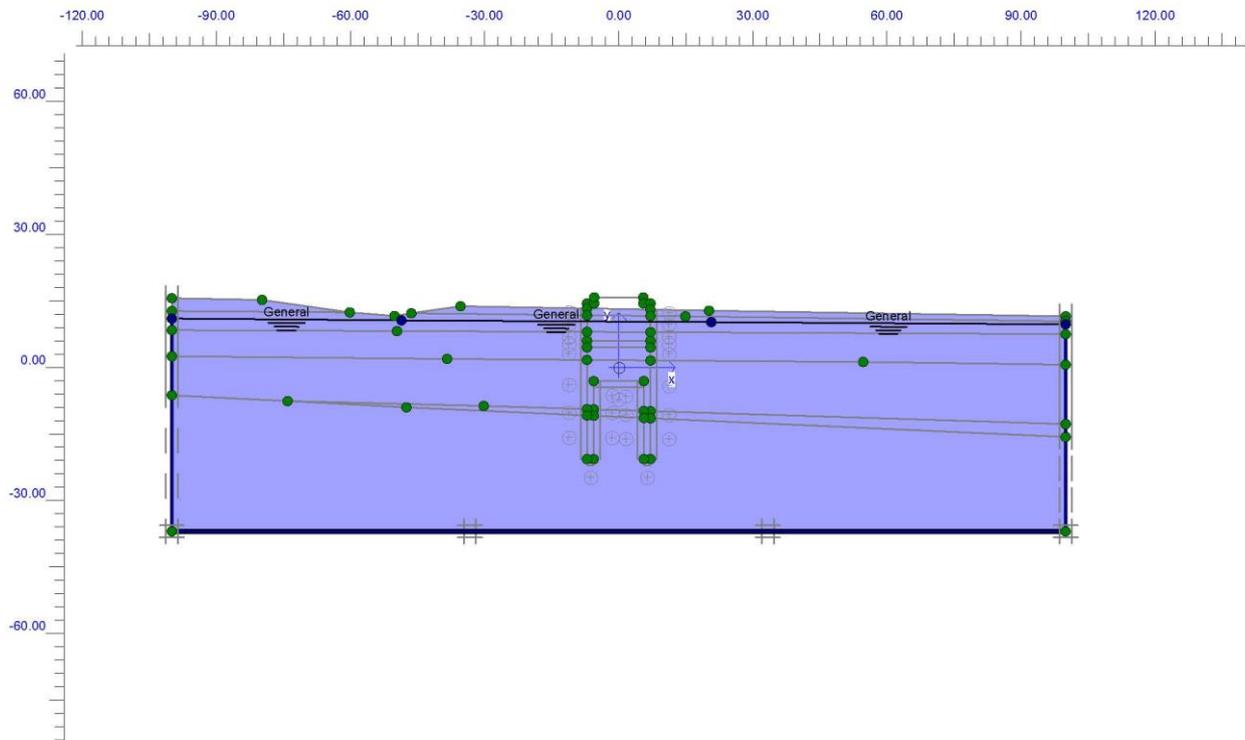


Figura 45 – Modello idrogeologico e livello di falda utilizzati per l'analisi del flusso nella condizione iniziale.

Come evidenziato dalle immagini riportate (Figura 46, Figura 47, Figura 48, Figura 49), il modello simula correttamente la superficie piezometrica ricostruita sulla scorta dei dati di sondaggio. Il deflusso avviene principalmente all'interno degli orizzonti sabbioso-limosi, che presentano notevole spessore, e del livello ghiaioso-sabbioso di base, che presenta elevata permeabilità (Figura 46).

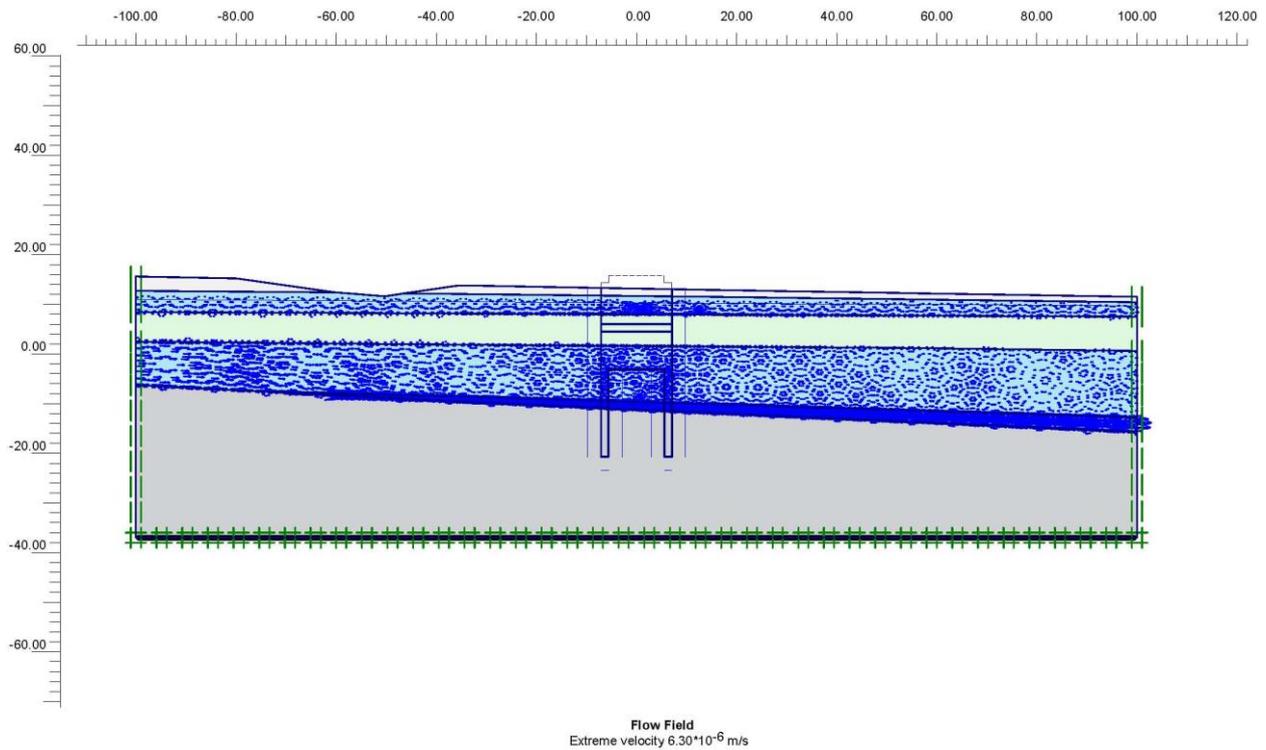


Figura 46 – Andamento dei vettori di flusso nella condizione iniziale.

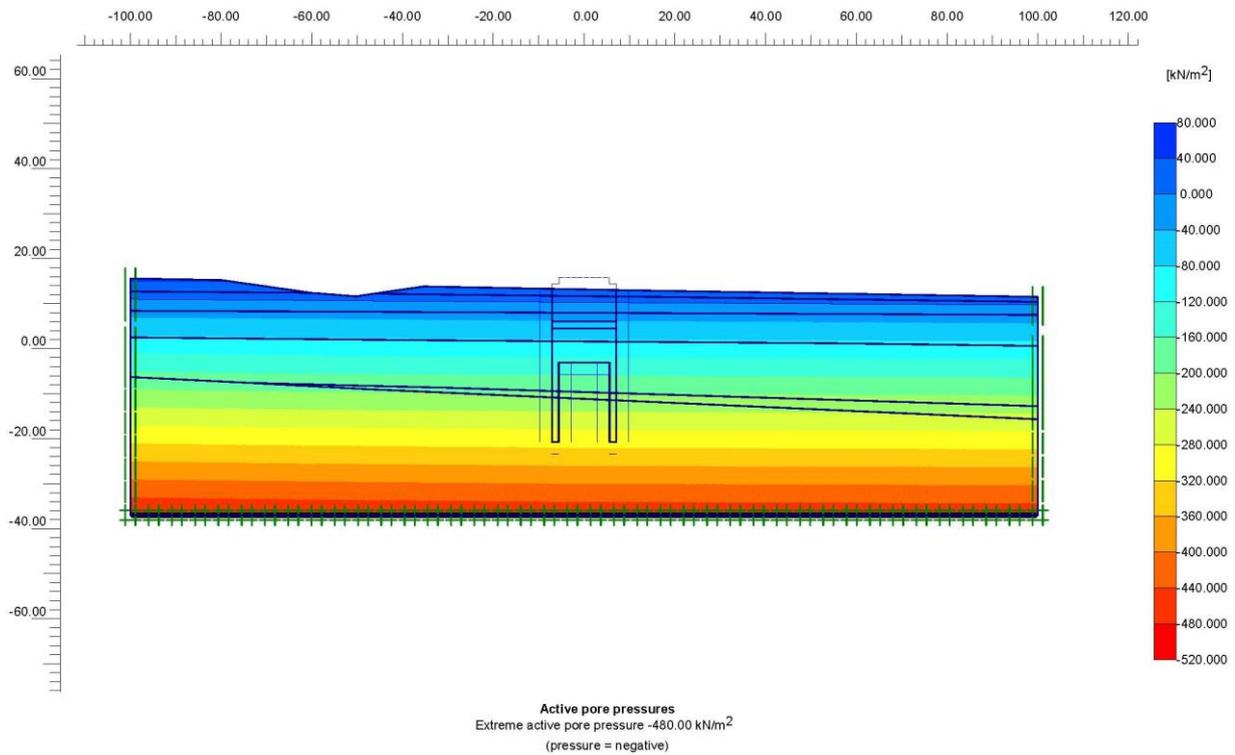
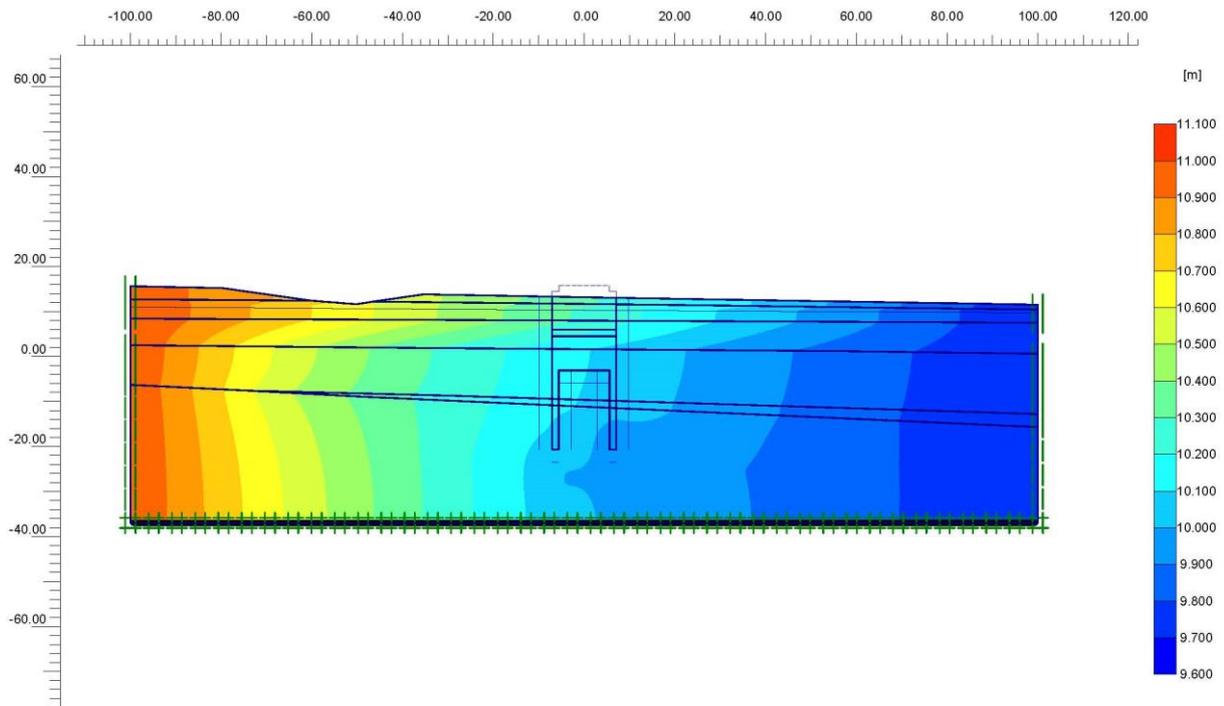


Figura 47 – Andamento delle pressioni interstiziali nella condizione iniziale.



Active groundwater head
Extreme groundwater head 11.00 m

Figura 48 – Andamento delle linee equipotenziali nella condizione iniziale.

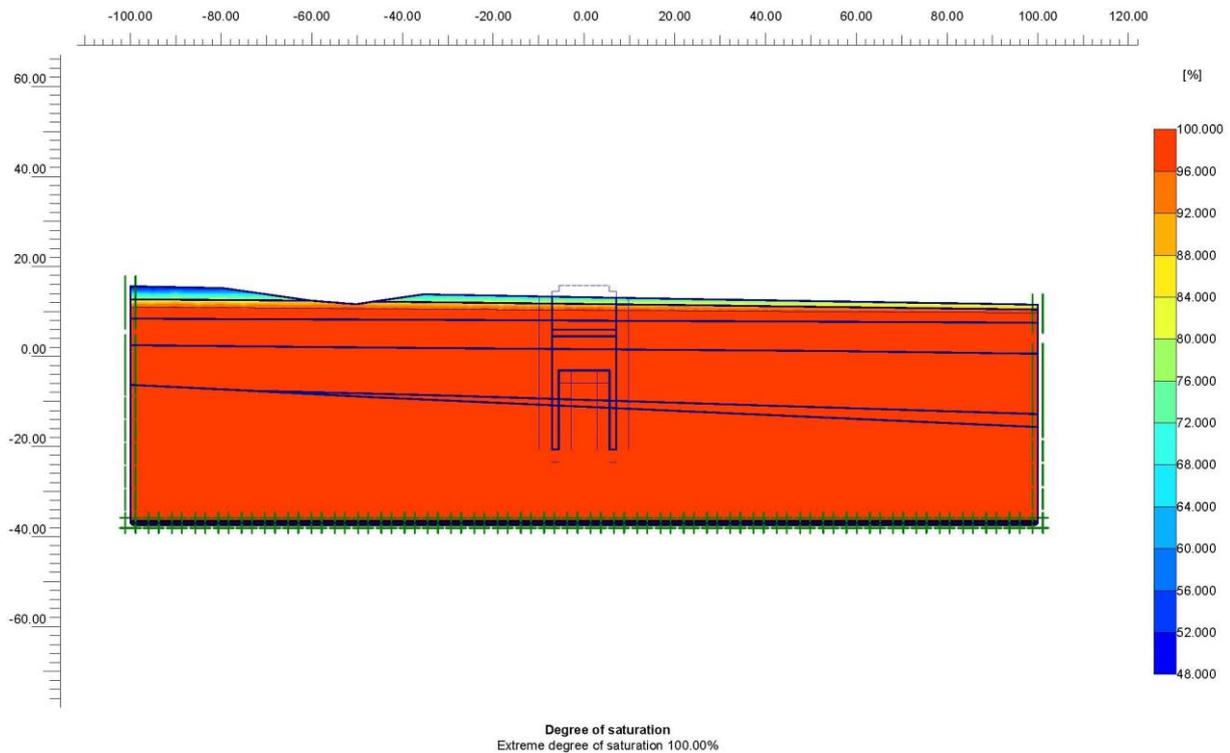


Figura 49 – Grado di saturazione dei terreni nella condizione iniziale.

4.3.2 *Flusso dopo la realizzazione dell'opera*

Come nelle sezioni precedentemente descritte, per poter valutare l'interferenza prodotta dagli interventi in progetto sul deflusso idrico sotterraneo dell'area, nel modello iniziale è stata inserita l'opera in questione (Figura 50, Figura 51). Dal punto di vista modellistico l'opera è sempre costituita da un mezzo non poroso e, quindi, praticamente impermeabile.

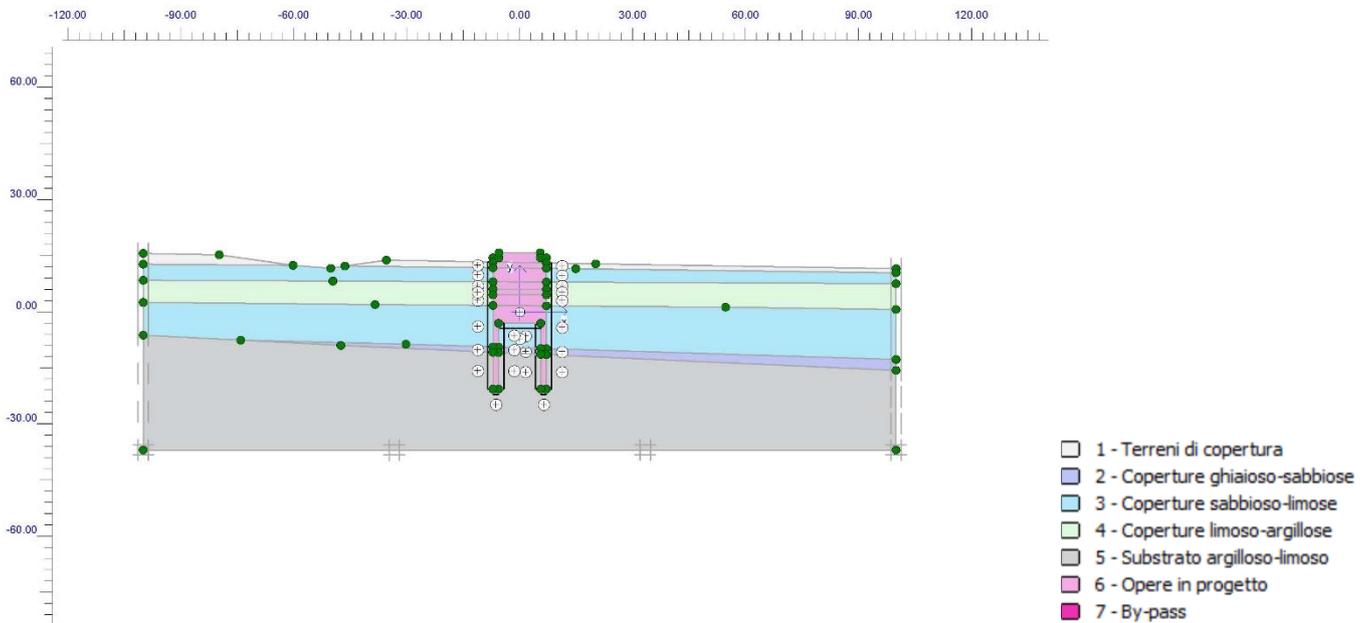


Figura 50 – Modello geologico utilizzato per l'analisi del flusso dopo la realizzazione dell'opera.

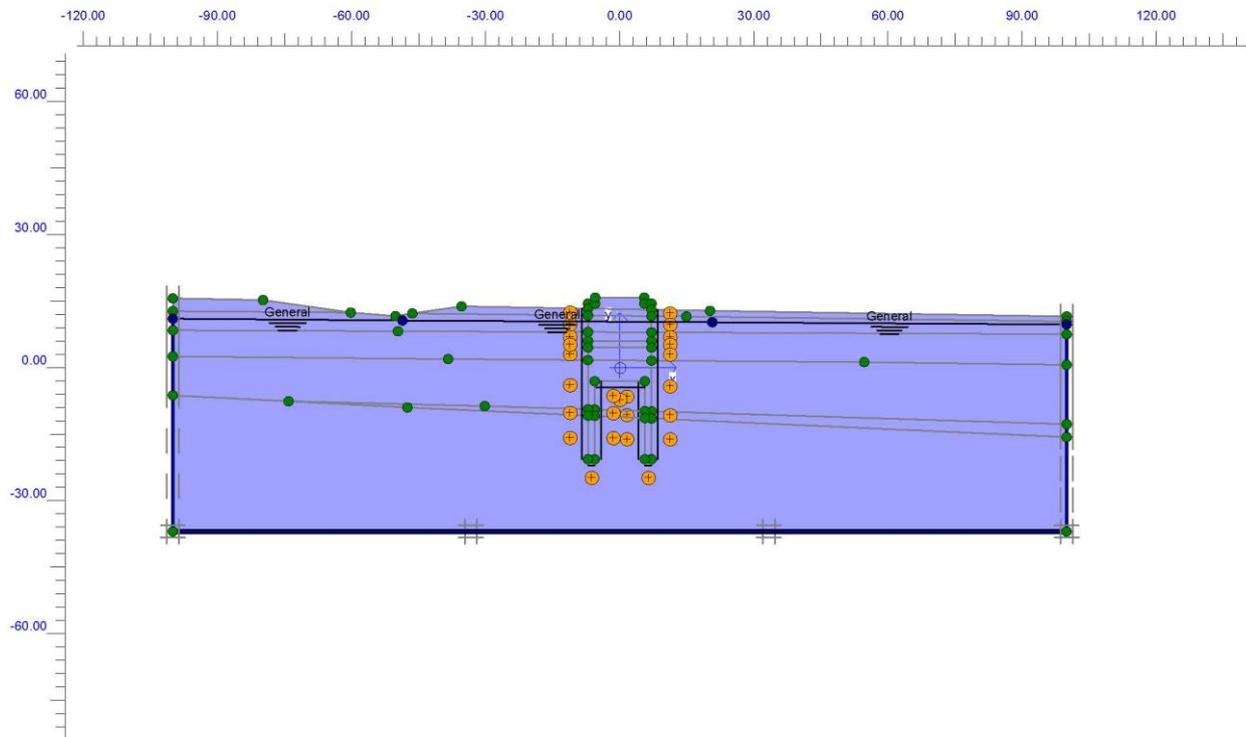


Figura 51 – Modello idrogeologico e livello di falda utilizzati per l'analisi del flusso dopo la realizzazione dell'opera.

Le elaborazioni condotte (Figura 52, Figura 53, Figura 54, Figura 55) dimostrano che il modello riesce a simulare correttamente la variazione dello schema di circolazione idrica sotterranea a seguito della realizzazione dell'opera.

In questa condizione, il flusso all'interno dei depositi di copertura viene completamente tamponato e indotto a passare al di sotto dello sbarramento idraulico, all'interno del substrato pelitico (Figura 52).

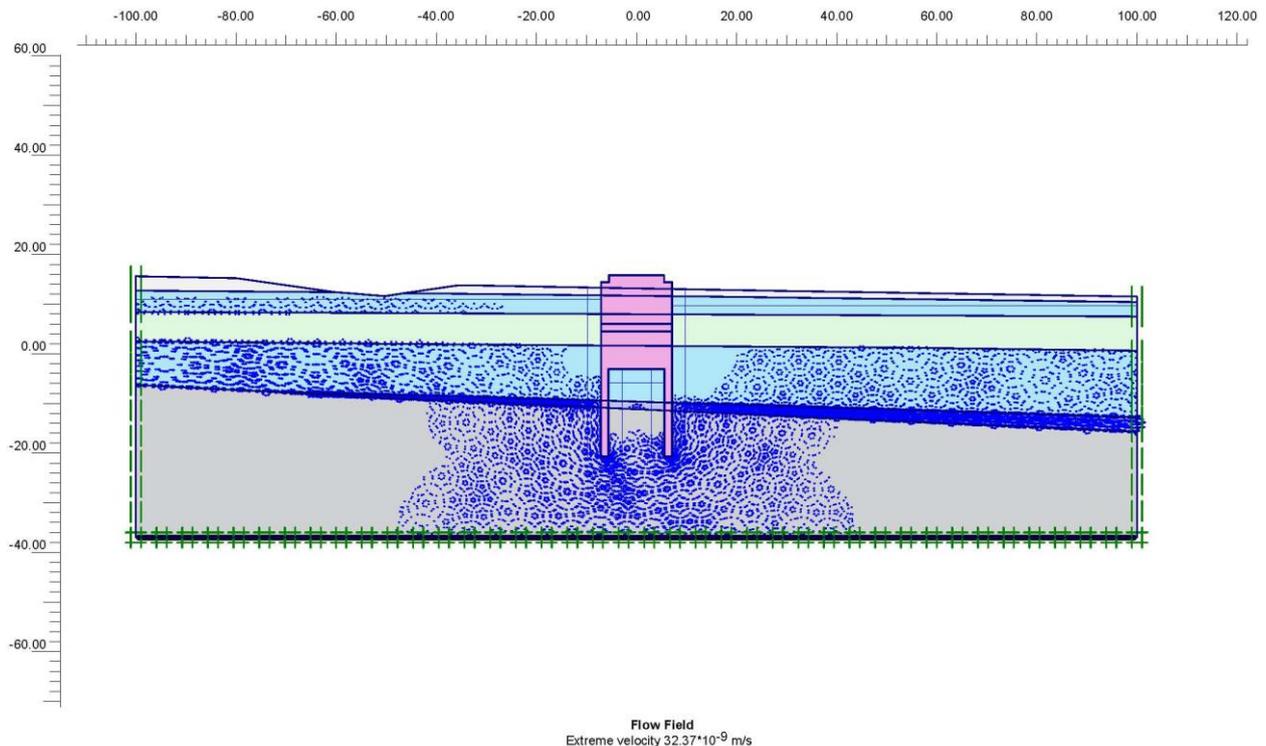


Figura 52 – Andamento dei vettori di flusso dopo la realizzazione dell'opera.

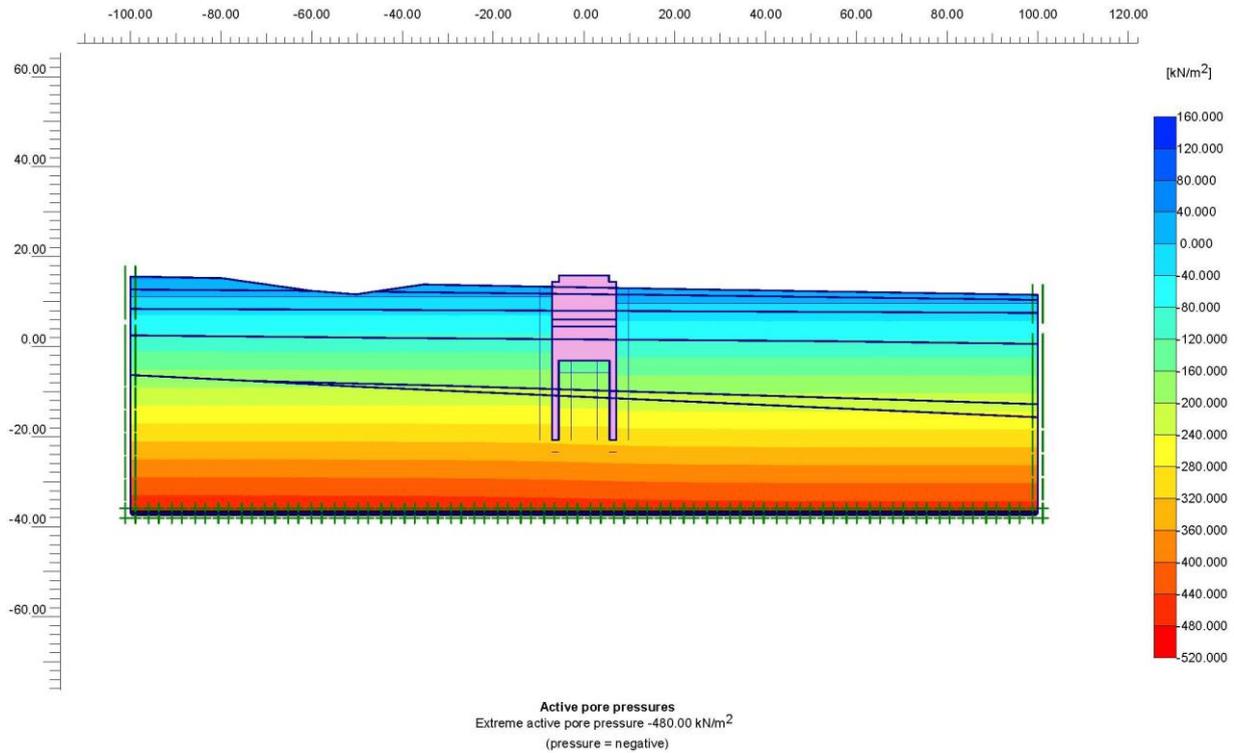


Figura 53 – Andamento delle pressioni interstiziali dopo la realizzazione dell'opera.

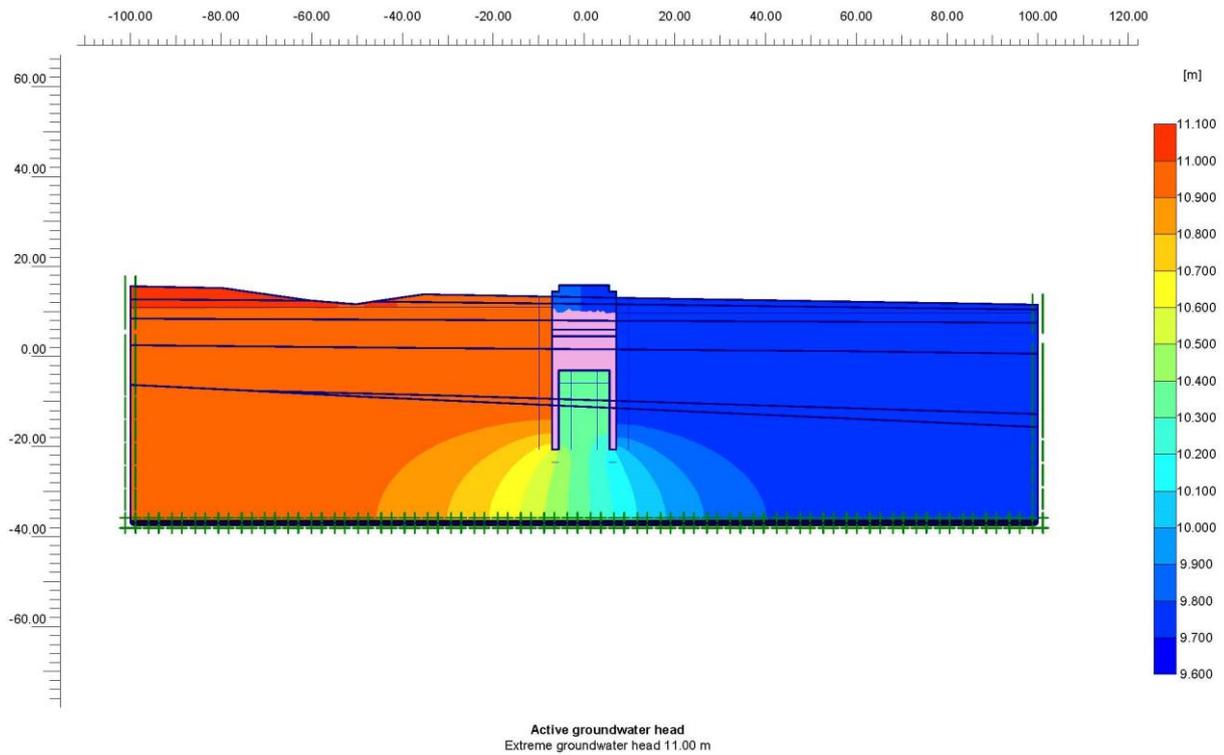


Figura 54 – Andamento delle linee equipotenziali dopo la realizzazione dell'opera.

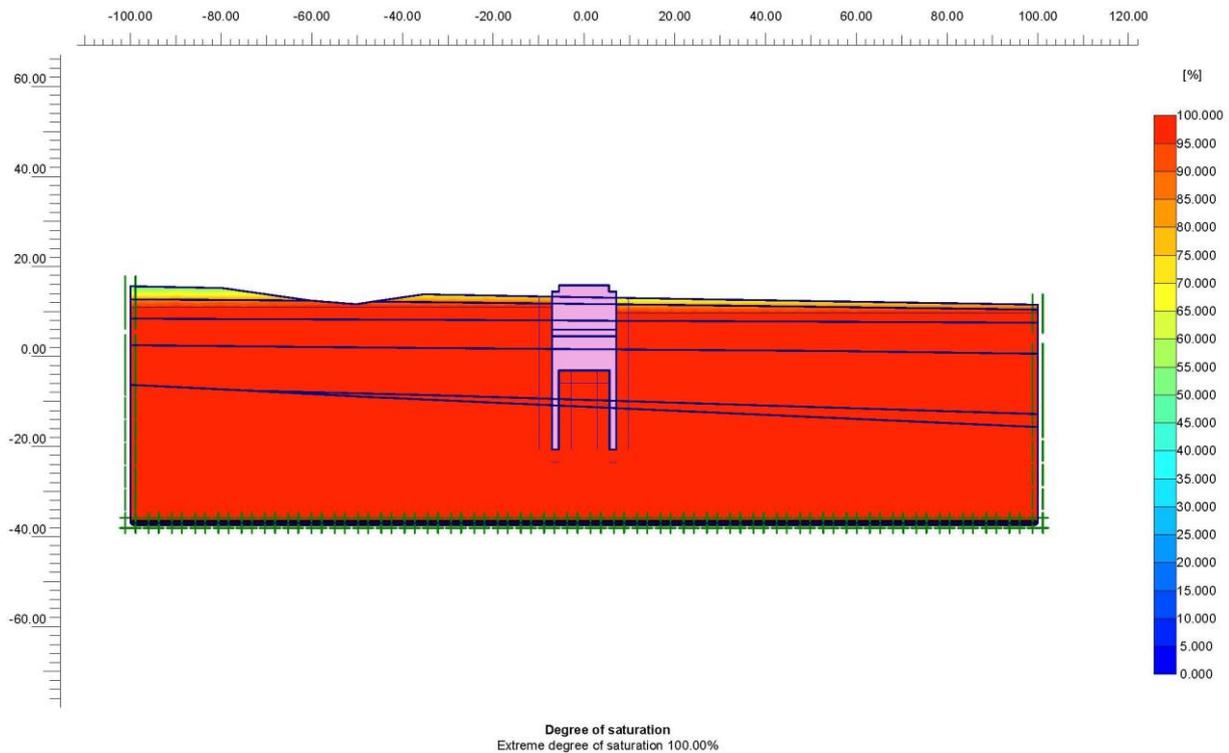


Figura 55 – Grado di saturazione dei terreni dopo la realizzazione dell’opera.

L’opera determina un completo sbarramento della falda presente nei depositi di copertura più superficiali e, pertanto, il flusso viene deviato verso il substrato pelitico alla base dell’opera. Quest’ultimo è caratterizzato da sottili orizzonti sabbiosi e sabbioso-limosi che permettono un deflusso, seppur lento, delle acque sotterranee. Nonostante ciò, la modesta permeabilità dei terreni di copertura interessati dalla realizzazione dell’opera e i limitati apporti idrici sotterranei che arrivano in corrispondenza della zona di sbarramento, fanno sì che le variazioni del livello piezometrico a seguito della realizzazione dell’opera risultino piuttosto basse e, comunque, nell’ordine di poche decine di centimetri, sia a monte che a valle.

Nella tabella seguente sono riportate le quote del livello di falda in corrispondenza dell’opera in progetto nelle condizioni iniziali e dopo la realizzazione degli interventi.

	Lato monte	Lato valle
Condizioni iniziali (quota in m s.l.m.)	10.34	10.25
Dopo la realizzazione dell’opera (quota in m s.l.m.)	10.90	9.70
Variazione (ΔH in m)	+0.56	-0.55

In particolare, sul lato di monte dell’opera il livello piezometrico aumenta di circa 0.56 m, passando dai 10.34 m s.l.m. della condizione iniziale a circa 10.90 m s.l.m. dopo la realizzazione dell’opera. Al contrario sul lato di valle il livello piezometrico diminuisce di circa 0.55 m, passando dai 10.25 m s.l.m. della condizione iniziale a circa 9.70 m s.l.m. dopo la realizzazione dell’opera.

4.3.3 Flusso con la realizzazione del by-pass

Come per la Sezione 2, le variazioni del livello di falda prodotte dalla realizzazione dell'opera risultano incompatibili col contesto antropico e naturale in cui si collocano. Per questo motivo, anche nella Sezione 3 è stata prevista la realizzazione di un by-pass idraulico per minimizzare gli effetti di variazione del deflusso idrico sotterraneo prodotti dall'opera.

Al fine di valutare l'influenza del by-pass sul regime di circolazione idrica dell'area, nel modello è stato inserito un elemento ad elevata permeabilità all'interno dell'opera (Figura 56; Figura 57). Come in tutti i casi, l'opera è costituita da un mezzo non poroso e praticamente impermeabile.

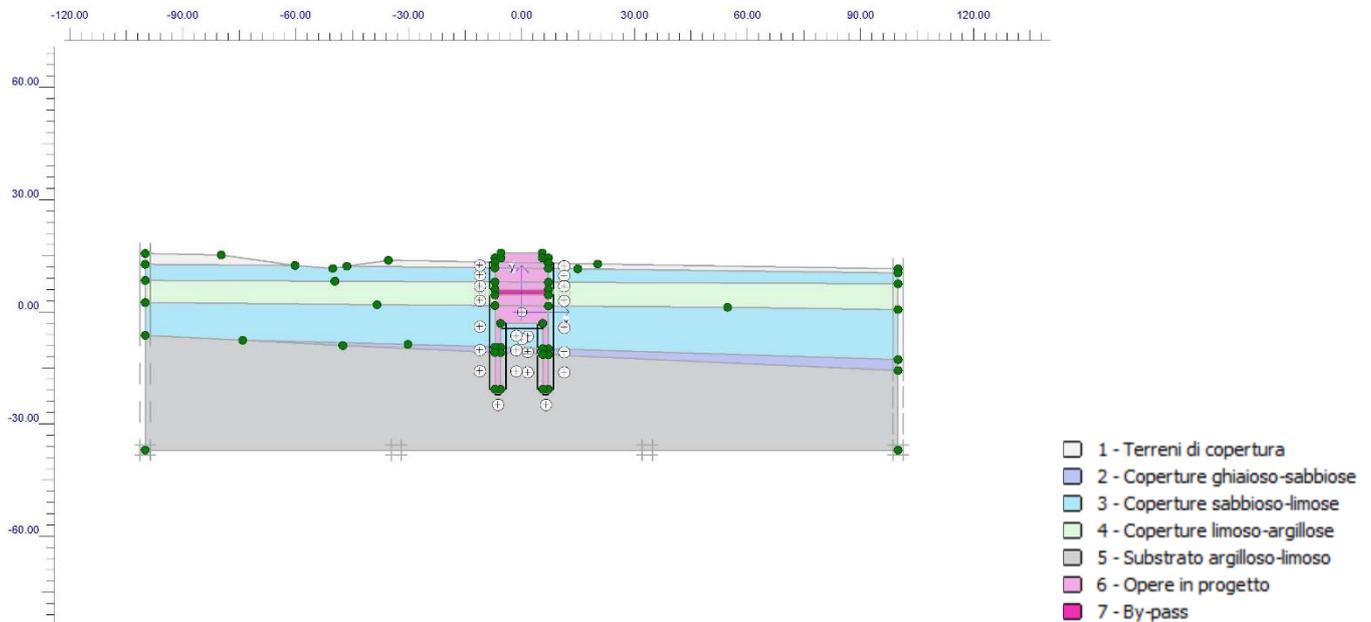


Figura 56 – Modello geologico utilizzato per l'analisi del flusso con la realizzazione del by-pass.

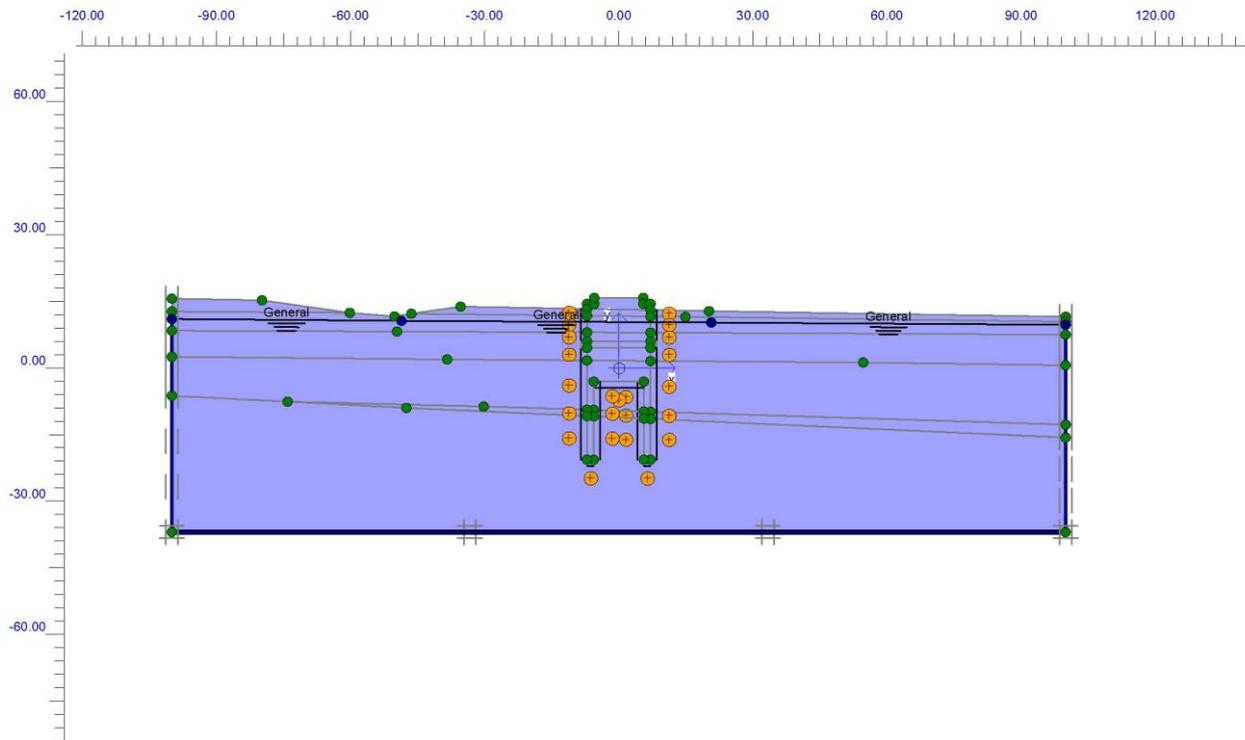


Figura 57 – Modello idrogeologico e livello di falda utilizzati per l’analisi del flusso con la realizzazione del by-pass.

Come visibile dalle immagini seguenti (Figura 58, Figura 59, Figura 60, Figura 61), il modello prodotto simula efficacemente la variazione dello schema di circolazione idrica sotterranea prodotto dalla realizzazione dell’opera e dall’inserimento del by-pass. In questo caso, il flusso dei due orizzonti sabbioso-limosi più superficiali viene quasi completamente tamponato dagli interventi in progetto, anche se il by-pass riesce almeno in parte a ripristinare il deflusso tra i settori di monte e quelli di valle (Figura 58). Verso il basso, l’orizzonte ghiaioso-sabbioso più profondo risulta completamente tamponato e, pertanto, parte del flusso viene ancora forzato a passare al di sotto dell’opera in progetto.

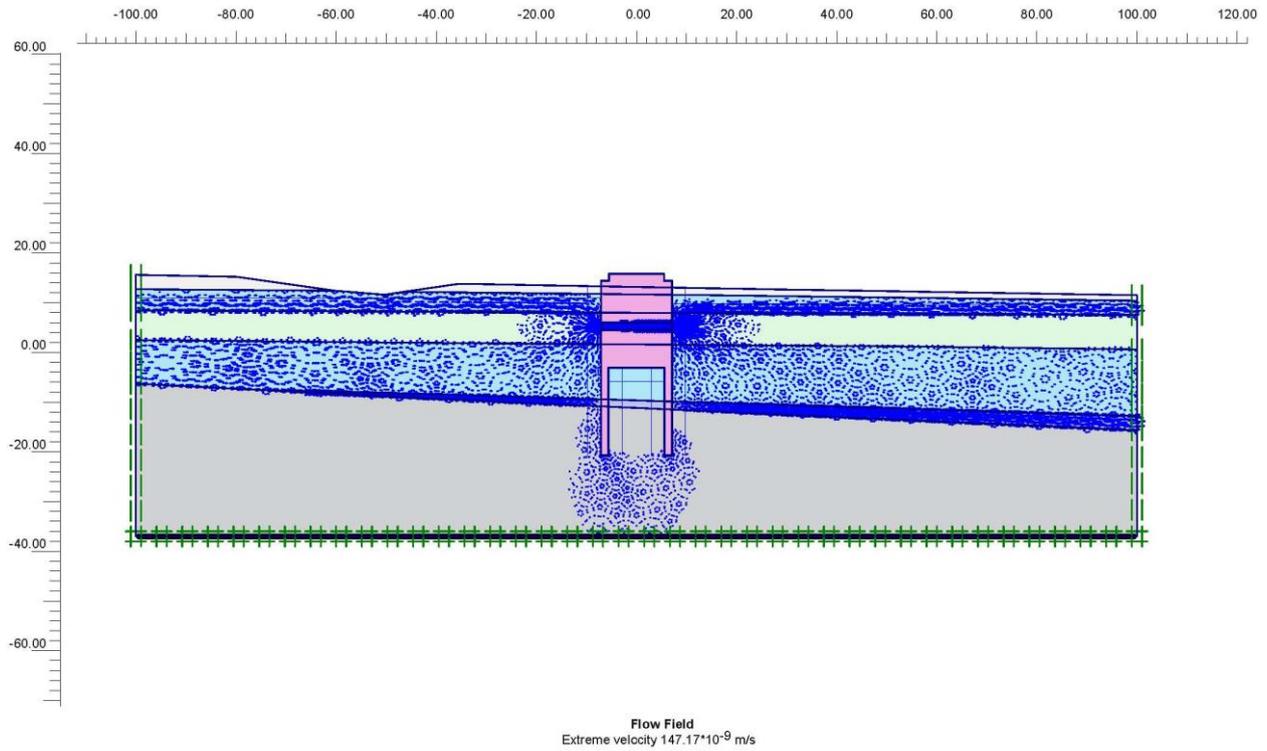


Figura 58 – Andamento dei vettori di flusso con la realizzazione del by-pass.

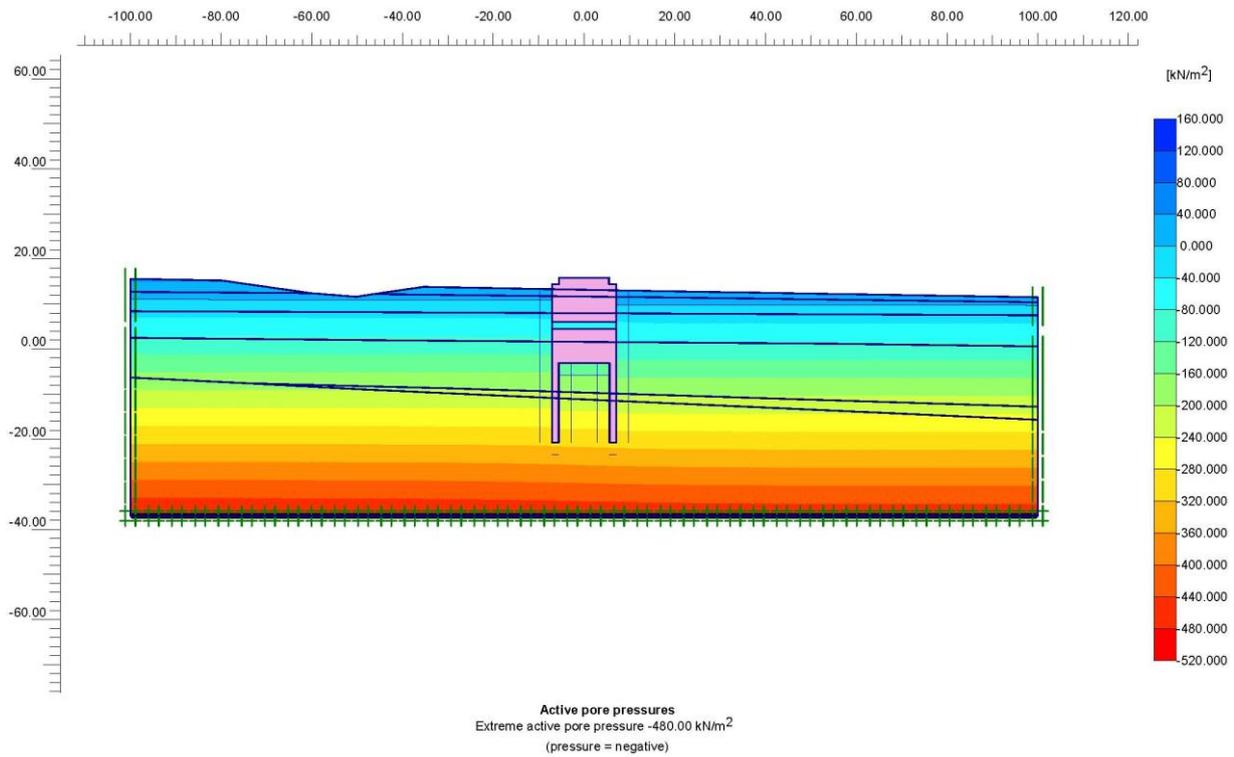


Figura 59 – Andamento delle pressioni interstiziali con la realizzazione del by-pass.

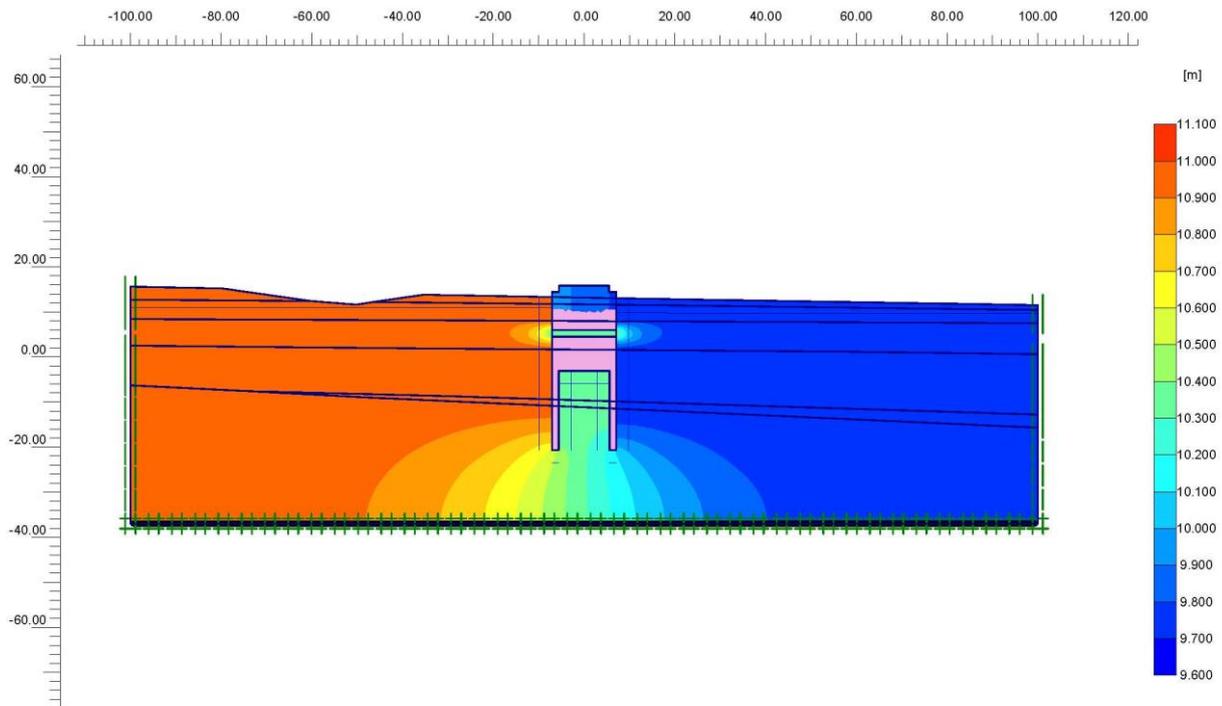


Figura 60 – Andamento delle linee equipotenziali con la realizzazione del by-pass.

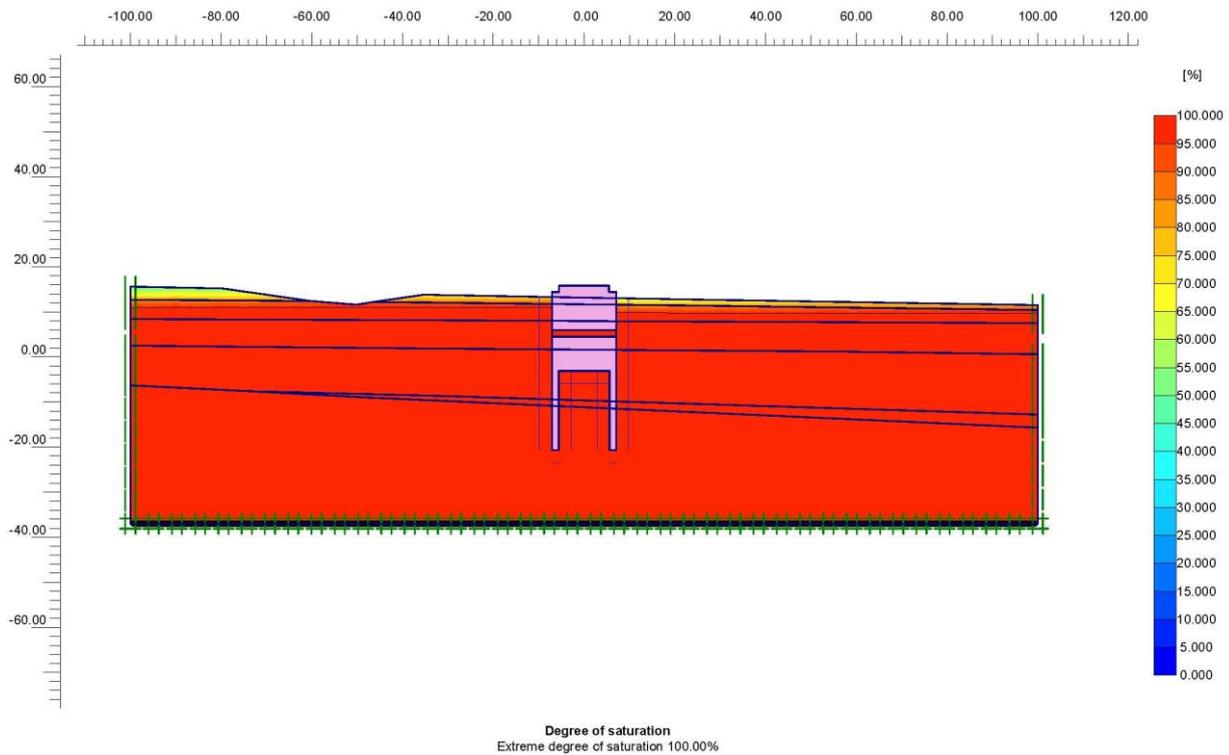


Figura 61 – Grado di saturazione dei terreni con la realizzazione del by-pass.

L'inserimento del by-pass idraulico consente il raccordo tra i corpi idrici presenti a monte e a valle dell'opera, in quanto permette di ripristinare il deflusso idrico sotterraneo dei livelli sabbioso-limosi più permeabili. Il livello ghiaioso-sabbioso più profondo, invece, continua ad essere completamente tamponato dall'opera in progetto e, quindi, le acque sono forzate a passare al di sotto dell'opera, all'interno del substrato pelitico. Nonostante rimangano ancora discrete variazioni del livello di falda, il by-pass permette di minimizzare tali effetti, riducendo sensibilmente le variazioni indotte.

Nella tabella seguente sono riportate le quote del livello di falda in corrispondenza dell'opera in progetto nelle condizioni iniziali e dopo la realizzazione del by-pass.

	Lato monte	Lato valle
Condizioni iniziali (quota in m s.l.m.)	10.34	10.25
Dopo la realizzazione dell'opera (quota in m s.l.m.)	10.90	9.70
Variazione (ΔH in m)	+0.56	-0.45

A seguito dell'inserimento del by-pass, sul lato di monte dell'opera il livello piezometrico aumenta di circa 0.56 m, passando dai 10.34 m s.l.m. della condizione iniziale a circa 10.90 m s.l.m. dopo la realizzazione del by-pass. Al contrario sul lato di valle il livello piezometrico diminuisce di circa 0.45 m, passando dai 10.25 m s.l.m. della condizione iniziale a circa 9.70 m s.l.m. dopo la realizzazione dell'opera.

Mettendo a confronto questi dati con quelli dell'opera senza by-pass, si nota come l'inserimento di un elemento ad elevata permeabilità consenta di ridurre almeno in parte le variazioni della superficie piezometrica prodotte dalla



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO
NODO DI CATANIA

INTERRAMENTO LINEA PER IL PROLUNGAMENTO DELLA
PISTA DELL'AEROPORTO DI FONTANAROSSA E PER LA MESSA
A STI DEL TRATTO DI LINEA INTERESSATO.

RELAZIONE MODELLAZIONE IDROGEOLOGICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3H	00	D69RH	GE 00 02 002	A	68 di 70

realizzazione dell'opera. A monte, il by-pass non incide sensibilmente sull'innalzamento della falda, che rimane fermo a circa 0.56 m, mentre a valle consente di ridurre di circa 0.10 m gli abbassamenti della stessa.



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO
NODO DI CATANIA

INTERRAMENTO LINEA PER IL PROLUNGAMENTO DELLA
PISTA DELL'AEROPORTO DI FONTANAROSSA E PER LA MESSA
A STI DEL TRATTO DI LINEA INTERESSATO.

RELAZIONE MODELLAZIONE IDROGEOLOGICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3H	00	D69RH	GE 00 02 002	A	69 di 70

5 CONCLUSIONI

Nell'ambito dello studio per il Progetto Definitivo dell' *"Interramento linea per il prolungamento della pista dell'aeroporto di Fontanarossa e per la messa a sti del tratto di linea interessato"* sono state effettuate una serie di analisi e modellazioni numeriche volte a definire gli impatti indotti dalla realizzazione dell'opera in progetto sul regime di circolazione idrica sotterranea della zona di intervento. In particolare, questi ultimi sono stati determinati in maniera quantitativa attraverso l'implementazione di modelli di flusso e analisi numeriche lungo n. 3 sezioni trasversali al tracciato di progetto, collocate nella porzione di territorio dove sono previste le opere più influenti sulle caratteristiche idrogeologiche dell'area.

Le analisi sono state condotte attraverso l'utilizzo col codice agli elementi finiti PLAXIS 2D versione 8.6. Le verifiche sulle n. 3 sezioni sono state eseguite in due distinte fasi: 1) determinazione delle caratteristiche del moto nelle condizioni iniziali, in assenza delle opere in progetto; 2) determinazione degli effetti indotti dagli interventi in questione sulle condizioni di deflusso idrico sotterraneo nell'area. In tal modo è stato possibile valutare in maniera quantitativa gli innalzamenti e gli abbassamenti della superficie piezometrica a seguito della realizzazione delle opere in progetto.

Solo per le Sezioni 2 e 3 è prevista la realizzazione di un by-pass idraulico, costituito da una trincea drenante di elevata permeabilità ($k = 1$ m/s) posta al di sotto del solettone inferiore dell'opera. In questi due casi, è stata quindi introdotta anche una terza fase di analisi, al fine di determinare gli effetti indotti sia dall'opera che dal by-pass sulle condizioni di deflusso idrico sotterraneo nell'area. In questo modo è stato possibile definire quantitativamente sia le variazioni indotte sul livello di falda che il funzionamento e l'influenza del by-pass.

Le simulazioni effettuate evidenziano che, a seguito della realizzazione degli interventi in questione, si originano variazioni del livello piezometrico piuttosto contenute. Sul lato di monte delle opere si osserva sempre un innalzamento del livello di falda, variabile tra 38 cm e 56 cm, mentre sul lato di valle si osserva sempre un abbassamento del livello piezometrico, variabile tra -33 cm e -73 cm.

Nonostante la ridotta entità delle variazioni indotte dalle opere, in relazione al complesso scenario naturale e antropico in cui si inserisce l'opera, nelle Sezioni 2 e 3 è stato scelto di introdurre un by-pass ad elevata permeabilità, al fine di minimizzare gli effetti indotti nel sistema idrogeologico locale caratterizzato da ridotta soggiacenza della falda. L'inserimento del by-pass permette di ripristinare almeno in parte le condizioni di deflusso dell'area e di ridurre al minimo le variazioni del livello di falda. Dopo l'inserimento della trincea drenante, infatti, gli innalzamenti a monte dell'opera di riducono fino a valori compresi tra 18 cm e 56 cm, mentre gli abbassamenti diminuiscono fino a valori compresi tra -45 cm e -63 cm.

Si sottolinea che le ipotesi di calcolo adottate risultano cautelative, sia per il livello di partenza della falda considerato al suo massimo sia per le caratteristiche degli acquiferi considerati con valori tali da consentire l'arrivo in corrispondenza dell'opera di importanti quantitativi di acqua. Inoltre, nei modelli è stata considerata un'opera di lunghezza infinita in senso trasversale, capace quindi di sbarrare completamente il flusso nel tratto di sezione interessato, mentre nella realtà la lunghezza effettiva delle opere in sotterraneo è comunque limitata e tale da garantire un parziale drenaggio anche ai lati della stessa.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO NODO DI CATANIA INTERRAMENTO LINEA PER IL PROLUNGAMENTO DELLA PISTA DELL'AEROPORTO DI FONTANAROSSA E PER LA MESSA A STI DEL TRATTO DI LINEA INTERESSATO.					
	RELAZIONE MODELLAZIONE IDROGEOLOGICA	COMMESSA RS3H	LOTTO 00	CODIFICA D69RH	DOCUMENTO GE 00 02 002	REV. A

6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Budhu M., 2007. Soil mechanics and foundations (2nd edition). John Wiley, Sons.

Carbone S., 2011. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000. Foglio 641, Augusta. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

Carbone S., Grasso M., Lentini F., 2009. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000. Foglio 634, Catania. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

Carbone S., Lentini F., Branca S., 2010. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000. Foglio 633, Paternò. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

Celico P., 1986. Prospezioni idrogeologiche. Liguori Editore, Napoli.

Comune di Catania, 2011. Carta Idrogeologica. Assessorato all'urbanistica - Direzione urbanistica e gestione del territorio 3.

Ferrara F., 1994. Carta della vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero vulcanico dell'Etna. Scala 1:50000. S.EL.CA., Firenze.

Ferrara V., 1975. Idrogeologia del versante orientale dell'Etna. Atti del 3° Convegno Internazionale sulle Acque Sotterranee, Palermo: 91-144.

Ferrara V., 1998. Carta della vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero alluvionale della piana di Catania (Sicilia NE). In: Protezione e gestione delle Acque Sotterranee per il III millennio (Atti 3° Convegno Nazionale), Scala 1:50000, S.EL.CA., Firenze.

Ferrara V., 1999. Presentazione della carta di vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero alluvionale della Piana di Catania, Sicilia NE). Atti 3° Convegno Nazionale sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio 1: 1.99-1.104, CNR-GNDCI, Parma.

Ferrara V., 2001. Carta idrogeologica del massiccio vulcanico dell'Etna. S.EL.C.A., Firenze.

Ferrara V., Pappalardo G., 2004. Intensive exploitation effects on the alluvional acquifer of the Catania plain, Eastern Sicily, Italy). Geophysical International 43: 671-681.

Ferrara V., Pappalardo G., 2008. La carta idrogeologica del massiccio vulcanico dell'Etna come utile strumento per la gestione razionale delle risorse idriche sotterranee. Italian Journal of Engineering Geology and Environment spec. issue 1: 77-89.

Gonzalez De Vallejo L.I., 2005. Geoingegneria. Pearson Education Italia, Milano.

Lancellotta R., 2004. Geotecnica (terza edizione). Zanichelli Editore, Bologna.

Lentini F., Carbone S., Grasso M., 1984. Carta geologica della Sicilia sud-orientale, scala 1:100.000. S.EL.CA., Firenze.

Regione Sicilia, 2007. Piano di tutela delle acque della Sicilia.