

VARIANTE ALLA S.S. 1 "VIA AURELIA"  
Viabilità di accesso all'hub portuale di La Spezia  
Lavori di costruzione della variante alla S.S. 1 Via Aurelia - 3°Lotto  
2° Stralcio Funzionale B dallo Svincolo di Buon Viaggio allo Svincolo di San Venerio  
**COMPLETAMENTO**

PRECEDENTI LIVELLI DI PROGETTAZIONE DELL'APPALTO INTEGRATO ORIGINALE

PD n°1861 del 09/07/03 aggiornato al 10/12/08 - Delibera CIPE n°60 del 02/04/08  
PE n° 103 del 14/07/2011 - D.A. CDG-103321-P del 20/07/11  
PVT n°112 del 21/01/16 aggiornata al 28/10/16 - D.A. CDG-92950-P del 21/02/17  
Progetto Esecutivo Cantierabile Opere da Completare

**PROGETTO ESECUTIVO**

COD. GE266

PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

PROGETTISTA:

*Dott. Ing. Antonio Scalamandrè*  
*Ordine Ing. di Frosinone n. 1063*

IL GEOLOGO

*Dott. Geol. Flavio Capozucca*  
*Ordine Geol. del Lazio n. 1599*

COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

*Geom. Emiliano Paiella*

VISTO IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

*Dott. Ing. Fabrizio Cardone*

PROTOCOLLO

DATA

**STUDI, INDAGINI E RELAZIONI SPECIALISTICHE**  
**GEOTECNICA**  
**INTERVENTO DI PROGETTO - VERSANTE CAROZZO**  
**GENERALE**  
**RELAZIONE DI CALCOLO GEOTECNICO**

CODICE PROGETTO		NOME FILE		REVISIONE	SCALA
PROGETTO <b>DPGE0266</b>		T00OM00GETRE03B.doc			
LIV. PROG. <b>E 20</b>		CODICE ELAB. <b>T00OM00GETRE03</b>		<b>B</b>	-
D					
C					
B	Emissione in seguito ad istruttoria DIV	Dicembre 2020			
A	Emissione	Luglio 2020	Ing.	Ing.	Ing.
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

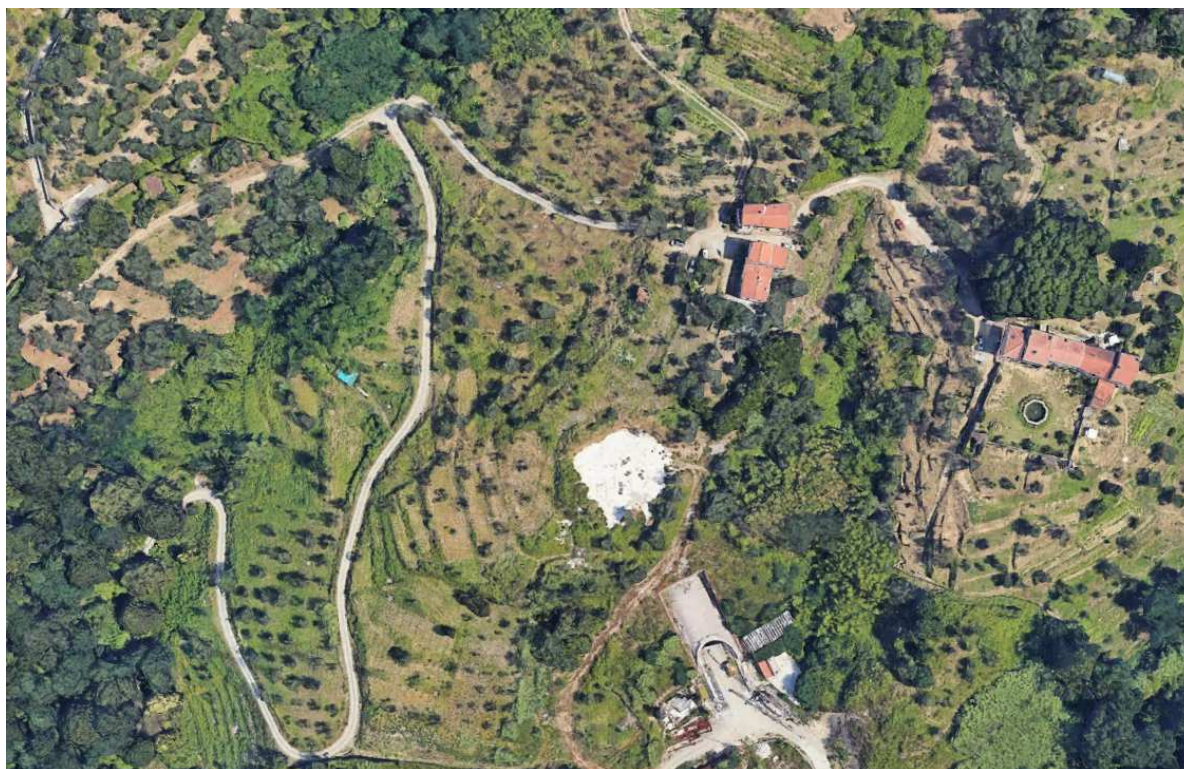
## VARIANTE ALLA S.S.1 “VIA AURELIA”

Viabilità di accesso all’hub portuale di La Spezia

Lavori di costruzione della variante alla S.S. 1 Via Aurelia – 3°Lotto

2°Stralcio Funzionale B dallo Svincolo di Buon Viaggio allo Svincolo di San Venerio

### COMPLETAMENTO



Studio Geotecnico del versante Carozzo interessato dalla Galleria Felettino I  
RELAZIONE DI CALCOLO GEOTECNICO

-	24.07.2020	AGI	CR
<b>Versione</b>	<b>Data</b>	<b>Redatto</b>	<b>Verificato</b>

**Lombardi Ingegneria S.r.l. – Socio Unico**

Via Giotto 36, IT-20145 Milano

Telefono +39 02 583 03 324, Fax +39 02 583 03 190

milano@lombardi.group, www.lombardi.group

Unità locale Torino

Via R. Montecuccoli 9, IT-10121 Torino, Italy

Telefono: +39 011 192 149 20, Fax: +39 02 583 03 190

torino@lombardi.group, www.lombardi.group

## INDICE

1.	INTRODUZIONE	3
2.	DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	4
2.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	4
2.2	DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO	4
2.3	CODICI DI CALCOLO	4
3.	CENNI DI GEOLOGIA DELL'AREA	5
3.1	Breve inquadramento geomorfologico	5
3.2	Le Unità Litologiche	6
4.	LA CAMPAGNA GEOGNOSTICA 2018 - 2019	8
4.1	Il monitoraggio eseguito durante la campagna geognostica	9
4.2	Il cinematismo di frana	11
4.3	Il profilo stratigrafico del versante e le unità geotecniche	12
5.	GLI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEL VERSANTE	15
5.1	I drenaggi a gravità	15
5.2	I pozzi drenanti	17
6.	I CRITERI DI PROGETTAZIONE AGLI STATI LIMITE	21
7.	I CODICI DI CALCOLO	23
7.1	IL CODICE DI CALCOLO PLAXIS 2D	23
7.2	IL CODICE DI CALCOLO TALREN	23
8.	LE ANALISI DI FILTRAZIONE	25
9.	LE VERIFICHE DI STABILITA'	27
10.	IL DIMENSIONAMENTO DELLA CONDOTTA DI COLLEGAMENTO DEI POZZI	32
10.1	Le portate filtranti con le formulazioni analitiche	32
10.2	Le portate filtranti nel modello FEM2D	33
10.3	Il dimensionamento della condotta	34



## 1. INTRODUZIONE

Il presente documento, redatto nell'ambito della fase di completamento del Progetto Esecutivo "Variante alla SS n. 1 Aurelia (Aurelia bis) - Viabilità di accesso all'hub portuale di La Spezia", si propone di descrivere le condizioni di instabilità attuali del versante di Carozzo, al cui piede si sviluppa il tracciato in artificiale della galleria "Felettino I" (dalla pk 2+290 alla pk 2+460 circa), e presentare gli interventi di consolidamento per la stabilizzazione del versante, mostrando i calcoli geotecnici di dimensionamento e verifica.

Nel seguito saranno presentati i seguenti temi:

- breve inquadramento geologico e geomorfologico dell'area in frana;
- sintesi dei risultati della campagna geognostica 2018 -2019 appositamente programmata e messa in atto da ANAS per la ricostruzione del modello di frana del versante di Carozzo;
- individuazione del modello di frana;
- descrizione degli interventi di consolidamento del versante per la stabilizzazione degli eventi franosi.
- Analisi e calcoli per il dimensionamento degli interventi di consolidamento.

## **2. DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO**

### **2.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

- [1] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: "Aggiornamento delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni".
- [2] Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.

### **2.2 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO**

- [3] T00GE00GETRE01A – Relazione geotecnica e sismica – Versante di Carozzo.
- [4] T00GE00GETRE02A – Relazione di analisi del monitoraggio – Versante di Carozzo.
- [5] T00GE00GETFG01A – Profilo geotecnico – Versante di Carozzo
- [6] T00GE00GETSG04A Sezioni geotecniche 4/4 – Sezione Geotecnica 5-5'
- [7] T00OM00GETRE02A Versante di Carozzo – Relazione di calcolo Modello 3D – Back Analysis

### **2.3 CODICI DI CALCOLO**

- [8] PLAXIS 2D 2019
- [9] Terrasol - Talren v.5.2.5 - <http://www.terrasol.fr/en>
  - 1. 4/4 – Sezione Geotecnica 5-5'

### 3. CENNI DI GEOLOGIA DELL'AREA

#### 3.1 Breve inquadramento geomorfologico

Il versante oggetto di indagine è ubicato ad Ovest della dorsale che divide il Golfo di La Spezia dalla bassa Val di Magra, nei pressi dell'abitato di Carozzo, come mostrato nella Figura 1. I territori interessati appartengono ai comuni di La Spezia e di Vezzano Ligure.



Figura 1 Ubicazione dell'area di studio e foto area (2016)

L'area di studio si sviluppa a quote comprese tra circa 30 e 210 m s.l.m. su di un versante esposto a SO, la cui porzione superiore risulta fortemente antropizzata in corrispondenza del sopracitato abitato, mentre la porzione sottostante, pur essendo meno antropizzata è interessata da rimodellamento antropico sottoforma di terrazzamenti agricoli, attualmente in uso.

Le cartografie disponibili mostrano la presenza di diversi corpi di frana ubicati sia nella porzione alta del versante che nella parte inferiore. La perimetrazione tratta dal Geoportale Nazionale (Figura 5) evidenzia, invece, un grosso corpo di frana che si estende dalla cima del versante fino a valle, unito ad altre due frane minori situate sui fianchi. Ciò è evidentemente testimonianza di fenomeni morfologici e gravitativi in continua evoluzione, con episodi di innesco di porzioni di versante circoscritte o più estese, e che si evolvono nel tempo

La tratta in artificiale della Galleria Felettino I lambisce il piede del versante.



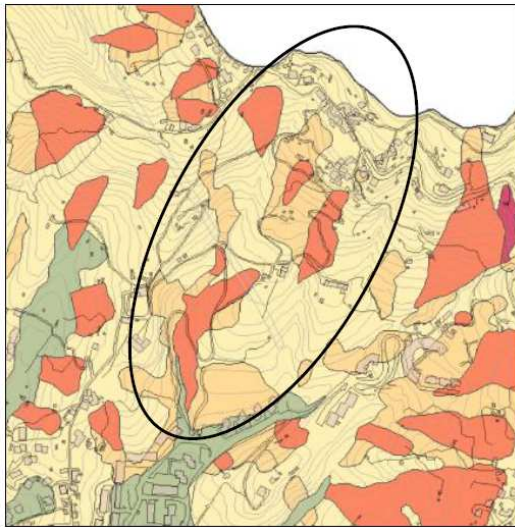


Figura 2 Stralcio della carta della suscettibilità d'uso del suolo, tratta dal PUC della Spezia (2003)

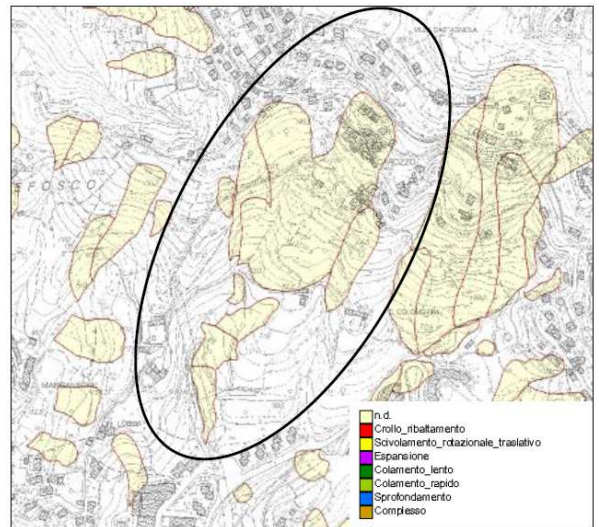


Figura 3 Perimetrazione delle frane tratta dal progetto IFFI; la cinematica non viene definita (n.d.)

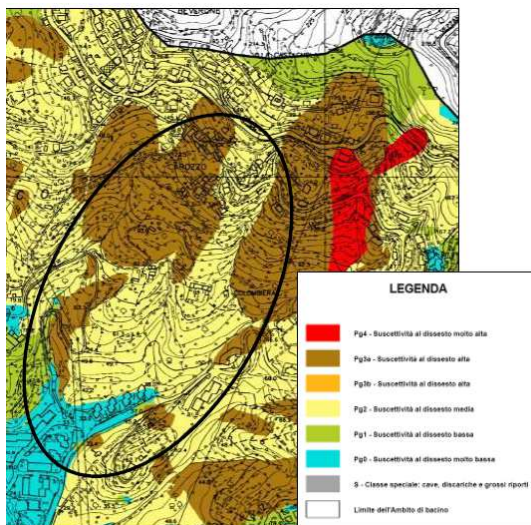


Figura 4 Stralcio della carta della suscettibilità al dissesto, tratta dal PAI-Ambito 20 Golfo della Spezia.

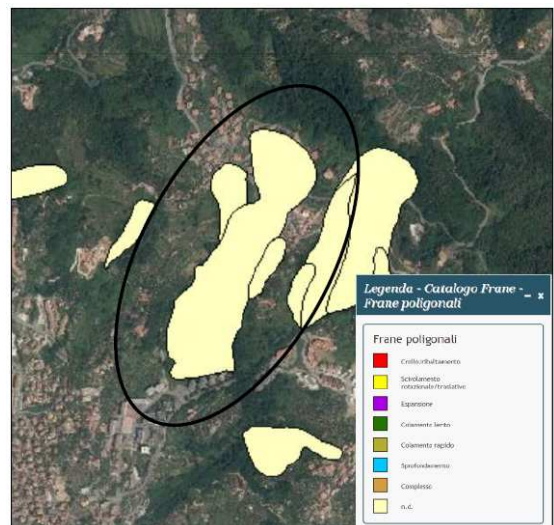


Figura 5 Perimetrazione delle frane tratta dal sito web del Geoportale Nazionale. La cinematica non viene definita (n.d.).

### 3.2 Le Unità Litologiche

Sul settore di versante oggetto di studio è possibile distinguere due unità tettoniche principali, denominate Unità Canetolo e Unità Bratica s.l..

L'Unità Canetolo è composta dalle Argille e Calcari di Canetolo (parte bassa della stratigrafia locale), al cui tetto si trova una lente abbastanza circoscritta di Calcari di Groppo del Vescovo. Le Argille e Calcari di Canetolo affiorano nell'area di studio prevalentemente sottoforma di argilliti foliate molto deformate in cui sono immersi sporadici livelli lentiformi di calcilutiti.

I Calcari di Groppo del Vescovo affiorano a Ovest di Villa Castagnola, e sono geometricamente posti al di sopra delle Argille e Calcari di Canetolo; gli affioramenti si presentano come calcari e calcari marnosi in cui si intercalano livelli più o meno spessi di argilliti.

L'Unità Bratica s.l. nell'area di studio (parte alta della stratigrafia locale) è suddivisibile in tre sub-unità, denominate uB1, uB2 e uB3, separate da contatti tettonizzati, nel dettaglio:

- L'unità uB1 è quella geometricamente più bassa e poggia direttamente sulla sottostante Unità Canetolo. Essa è rappresentata prevalentemente da calcari marnosi, marne siltose e argilliti, spesso micacee.
- L'unità sovrastante uB2 si presenta invece sottoforma di argilliti e siltiti subordinate, con intercalazioni più carbonatiche sottoforma di strati calcarei.
- L'unità più alta, uB3, rispecchia una facies prevalentemente silicoclastica sottoforma di siltiti, argilliti e arenarie fini, raramente anche a granulometria medio-grossolana, in strati da centimetrici a decimetrici.

Dal punto di vista geologico-strutturale, nell'area di studio, l'Unità Bratica s.l. è coinvolta da contatti tettonici riconducibili ai sistemi di faglie a basso angolo che interessano l'entroterra della Spezia. Il contatto basale Arenarie di Bratica - Calcari di Canetolo, ne rappresenta localmente l'espressione di primo ordine, elidendo progressivamente verso nord-est la sub-unità basale uB1 e portando uB2 direttamente a contatto con l'Unità Canetolo. L'elisione tettonica si manifesta attraverso zone di taglio, di spessore pari a diversi metri, in cui il protolite originario viene profondamente deformato e disarticolato, producendo delle rocce di faglia maggiormente esposte all'alterazione chimico-fisica, già di per se molto spinta nei litotipi presenti nella zona.

Nell'Unità Bratica s.l. si riconosce, inoltre, una strutturazione in treni di pieghe asimmetriche mediamente vergenti verso NE con assi a direzione appenninica.

I terreni coinvolti nei movimenti gravitativi che interessano il versante appartengono all'unità Bratica.

## 4. LA CAMPAGNA GEOGNOSTICA 2018 - 2019

Tra la fine dell'anno 2018 e l'inizio del 2019, con il fine di aggiornare e integrare il Modello Geologico e Geotecnico del versante a valle dell'abitato di Carozzo, Anas S.p.a. ha commissionato alla società SOCOTEC ITALIA Srl l'esecuzione di una nuova campagna d'indagini dirette e indirette.

In effetti, le precedenti campagne geognostiche, condotte nella fase della progettazione Definitiva ed Esecutiva, risultavano focalizzate sulle formazioni più profonde che sarebbero state interessate dallo scavo della galleria naturale "Felettino I" e, dunque, la caratterizzazione dei terreni del versante, soprattutto delle coltri più superficiali soggette ai fenomeni gravitativi, rimaneva lacunosa.

Le nuove indagini geotecniche e geofisiche eseguite nell'ultima campagna di sito sono state eseguite sia in prossimità dell'imbocco Sud della galleria "Felettino I", sia sulla restante parte del versante a valle di Carozzo.

Le nuove indagini hanno previsto:

- 7 sondaggi a carotaggio continuo;
- 3 sondaggi a distruzione di nucleo;
- Installazione di 4 colonne inclino-piezometriche automatiche di tipo DMS;
- Installazione di 4 colonne inclino-piezometriche automatiche di tipo MUMS;
- Installazione di 1 tubo inclinometrico per la lettura con sonda manuale;
- Installazione di 1 piezometro a tubo aperto;
- 5 stendimenti di sismica a rifrazione (SRT, onde P ed Sh);
- 1 stendimento di sismica a riflessione;
- 5 tomografie di resistività elettrica (ERT);

Nei fori di sondaggio sono state eseguite una serie di prove in situ (prove tipo SPT, prove pressiometriche, prove Lugeon, prove dilatometriche) e sui campioni di terreno e roccia recuperati nelle perforazioni, sono state eseguite prove geotecniche di laboratorio.

Per il dettaglio delle indagini, delle risultanze dei carotaggi e delle prove di sito e di laboratorio si rimanda agli specifici elaborati (doc. [3]).

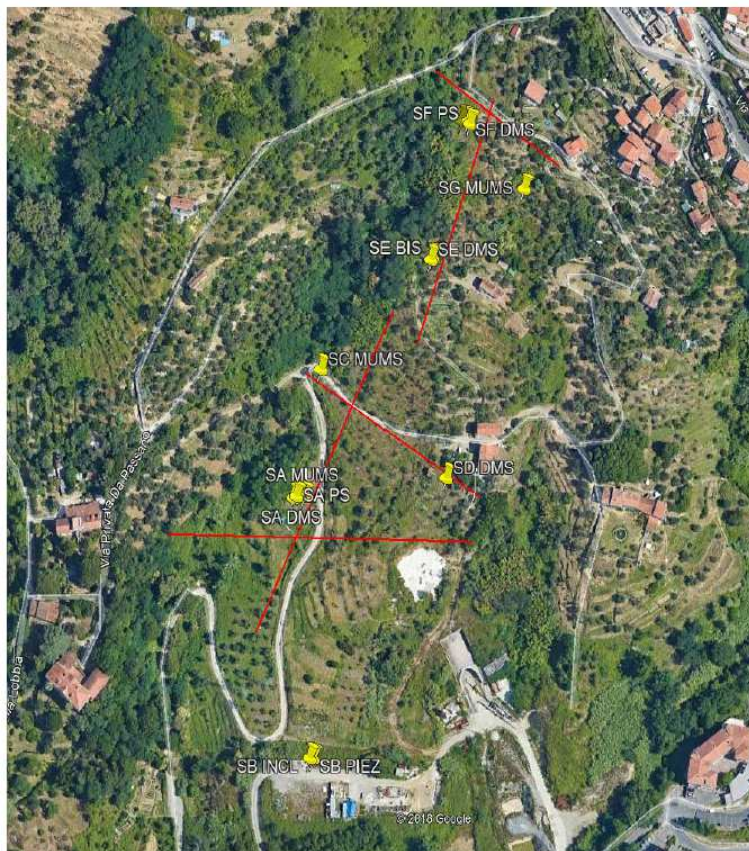


Figura 6 Planimetria con ubicazione delle postazioni sulla verticale eseguite nella campagna 2018-2019

#### 4.1 Il monitoraggio eseguito durante la campagna geognostica

Nella campagna geognostica 2018-2019 è stata installata la seguente strumentazione geotecnica:

- 4 catene inclinometriche automatiche tipo MUMS (*Modular Underground Monitoring System*), provviste di sensori piezometrici automatici per la misura della falda;
- 4 catene inclinometriche automatiche di tipo DMS (*Differential Monitoring of Stability*), provviste di sensori piezometrici automatici per la misura della falda;
- 1 tubo inclinometrico tradizionale, nel quale è prevista la misura per mezzo della sonda inclinometrica manuale;
- 1 piezometro a tubo aperto.

La strumentazione automatica, sia del tipo MUMS che del tipo DMS, consente la misura in continuo degli spostamenti e delle variazioni della falda; per informazioni di dettaglio sulla tecnologia e gli strumenti si rimanda alla documentazione specifica.

Il dettaglio dei dati rilevati in sito durante il monitoraggio dell'ultima campagna indagini è riportato nella relazione "Relazione sul modello della frana e analisi del monitoraggio eseguito" (doc [4]), in questa sede verranno solo richiamati gli elementi più significativi scaturiti dal monitoraggio, che hanno

costituito la base per l'interpretazione del fenomeno gravitativo che affligge il versante e, dunque per l'implementazione del modello 3D di analisi. Per ulteriori dettagli si rimanda alla relazione succitata.

Il monitoraggio inclinometrico nel periodo da febbraio 2019 al giugno 2019 ha evidenziato le seguenti profondità di movimento:

- **SF DMS** movimenti tra i **-4 e -6 m da p.c.**
- **SF MUMS** movimenti tra **-3 e -5 m da p.c.**
- **SG MUMS** movimenti tra **-6 e -8 m da p.c.**
- **SE DMS** movimenti tra **-7 e -9 m da p.c.**
- **SC MUMS** movimenti tra **-6 e -10 m da p.c.**
- **SD DMS** movimenti tra **-13 e -15 m da p.c.**
- **SA DMS** nessun movimento registrato
- **SB INCL** nessun movimento registrato

L'entità degli spostamenti cumulati alla testa degli strumenti raggiunge il valore massimo nel sondaggio SF DMS (circa 18 mm), a monte del versante, e si riduce progressivamente procedendo verso valle.

L'azimut dei movimenti tende a convergere per tutte le verticali nella direzione di massima pendenza del versante (N-O); l'unica eccezione si riscontra nel sondaggio SF MUMS, su cui persistono dubbi di affidabilità. Ciò induce a pensare che il movimento gravitativo interessi l'intera porzione del versante, limitata lateralmente dalle due incisioni presenti, e in basso dalla zona compresa tra l'inclinometro SA DMS e SB INCL, che non hanno registrato movimenti nel periodo di osservazione.

Per quanto riguarda le misure piezometriche, i dati provenienti dai sensori installati nei sondaggi eseguiti, evidenziano le seguenti variazioni della posizione della falda freatica nel periodo di monitoraggio:

- **SF DMS** variazione della falda tra **-0,85 e -1,2 m da p.c.**
- **SF MUMS** la falda risulta a piano campagna.
- **SG MUMS** variazione della falda tra **-7 e -8 m da p.c.**
- **SE DMS** variazione della falda SENSORE 1 (10 m) a **-3,85 m da p.c.** con delta di 1,55 m; SENSORE 2 (20 m) con variazioni minori (non indicato) con delta di 0,25 m.
- **SC MUMS** variazione della falda tra **-5 e -6 m da p.c.**
- **SD DMS** variazione della falda SENSORE 1 (10 m) a **-4,84 m da p.c.**; SENSORE 2 (25 m) a **-9,5 m da p.c.**, con delta di variazione per entrambi i sensori di **<0,2 m.**
- **SA MUMS** variazione della falda tra **-4,5 e -5 m da p.c.**
- **SA DMS** variazione della falda SENSORE 1 (12 m) tra **-9,15 e -9,9 m da p.c.**, con delta massimi di 2 m ca; SENSORE 2 (40 m), le variazioni sono decisamente minori (0,5 m) con un trend medio crescente nel periodo.
- **SB PZ** variazione della falda tra **-9,3 e -10,15 m da p.c.**

L'escursione della falda è di circa 1-2 m; nei piezometri ubicati a monte del pendio, la falda è molto superficiale, prossima al piano campagna; a valle invece il livello freatico si approfondisce

gradualmente, restando comunque sempre al di sopra della superficie di scorrimento rilevata dagli inclinometri.

## 4.2 Il cinematismo di frana

Le registrazioni dei movimenti con gli inclinometri insieme alle letture piezometriche nelle stesse verticali hanno reso possibile la ricostruzione dell'andamento plano-altimetrico della superficie di scivolamento basale e la comprensione dei meccanismi d'innescò dei cinematismi osservati durante l'ultima campagna indagini.

Ciò che si deduce dalle osservazioni di sito è che il fenomeno franoso si estende verosimilmente dalla porzione medio-alta del versante, all'incirca da quota 140 m s.l.m, in corrispondenza dell'abitato di Carozzo, fino alla parte medio-bassa del versante, a circa quota 70 m s.l.m.. Non si esclude inoltre, sebbene con maggior incertezza, che la superficie di scivolamento possa anche estendersi fino a circa quota 60 m s.l.m.. In effetti, sebbene l'inclinometro SA-DMS, posto al piede del pendio, non abbia rilevato spostamenti nel periodo di osservazione, le precedenti campagne d'indagine nella stessa area, e nello specifico quella condotta nel periodo 2014-2016, avevano permesso di rilevare spostamenti alla profondità di 9 m.

Dal punto di vista areale, il settore di versante in frana dovrebbe essere compreso tra le due principali incisioni presenti a valle dell'abitato di Carozzo.

Il confronto dei moduli di spostamento con le registrazioni del livello della falda ha evidenziato, in numerosi casi, un chiaro legame tra l'attivazione dei movimenti e i principali episodi meteorici avvenuti nel periodo di monitoraggio, responsabili, questi ultimi, del rialzo del livello della falda freatica. A titolo di esempio, la Figura 7 riporta la sovrapposizione degli spostamenti e delle quote piezometriche del sondaggio SE con i dati pluviometrici della stazione meteo vicina al versante (Monte Beverone).

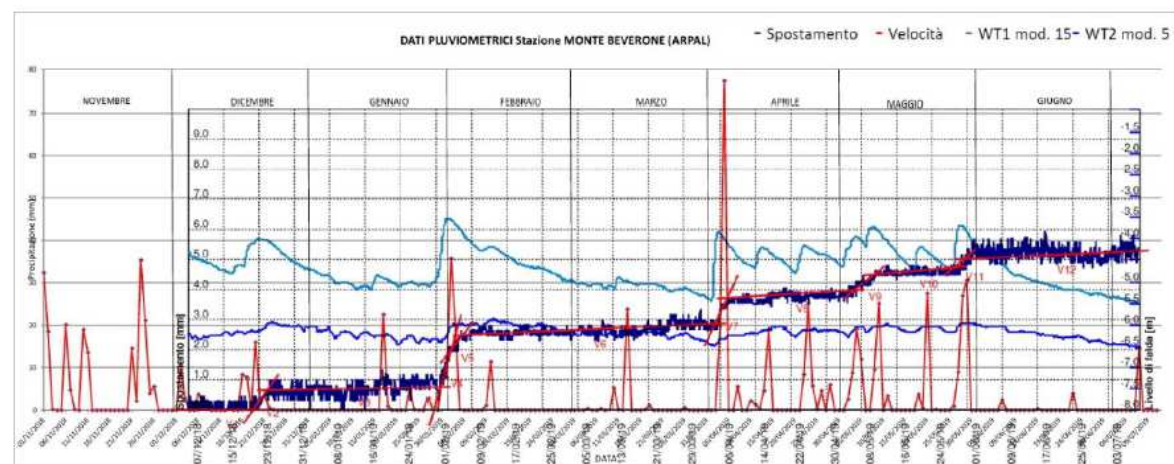


Figura 7 Sovrapposizione grafica modulo di spostamento – monitoraggio piezometrico sondaggio SE con le precipitazioni cumulate nel periodo Novembre 2018-Maggio 2019 registrate dalla stazione pluviometrica di Monte Beverone.

Il monitoraggio ha permesso di evidenziare che nei periodi scarsamente piovosi o in generale privi di fenomeni meteorici intensi, non si registrano movimenti significativi. Questo fatto avvalorava il presupposto del legame diretto tra l'apporto meteorico fornito dalle precipitazioni, registrato con le variazioni della falda freatica, e l'attivazione dei movimenti. L'assenza di movimenti nei periodi asciutti presuppone, probabilmente, l'assenza di fenomeni viscosi o in generale di scivolamenti lenti e continui. Più verosimilmente il fenomeno è caratterizzato da movimenti puntuali, con tempi d'innescio repentini alternati a periodi di generale arresto.

Dal punto di vista della profondità, i dati acquisiti confermano il carattere superficiale del fenomeno franoso, che assume spessore massimo di circa 15 m in corrispondenza del sondaggio SD DMS. I movimenti riconosciuti come certi sono perciò localizzati esclusivamente all'interno dei depositi incoerenti di natura eluvio-colluviale e nella porzione superiore del substrato roccioso, intensamente alterato e in taluni casi da parzialmente destrutturato a inconsistente e argillificato.

#### **4.3 Il profilo stratigrafico del versante e le unità geotecniche**

In base a quanto osservato nell'ultima campagna indagini è stato definito il modello stratigrafico del pendio e, in particolare, sono state distinte 3 principali Unità Geotecniche in grado di descrivere il comportamento geotecnico medio del sottosuolo indagato.

Nel dettaglio:

- Unità UG1: è l'unità più superficiale, inglobante sia i depositi eluvio-colluviali che la porzione superiore del substrato roccioso che si presenta alterata e fortemente destrutturata per effetto dei processi gravitativi che si sono succeduti negli anni. Si caratterizza, nelle zone più superficiali, per un colore che va dal giallastro al marrone bruno, con frequenti e diffuse tracce di ossidazione; nelle porzioni più profonde invece, i terreni assumono un colore grigiastro e si presentano con un grado maggiore di consistenza/addensamento. A sua volta questa unità si suddivide in 2 sub – unità: UG1b, costituita dalle porzioni di unità UG1 interessate dai fenomeni gravitativi, e UG1a, che rappresenta invece la sub unità al di sotto della superficie basale ricostruita dalle indagini e non interessata, dunque, dai cinatismi di frana;
- Unità UG2: orizzonte intermedio, costituito dal substrato roccioso indifferenziato, con ammasso roccioso generalmente di aspetto litoide, di debole resistenza, costituito da argilliti, calcari, calcari marnosi, marne siltose e siltiti, da fratturato a molto fratturato, con porzioni da poco consistenti a inconsistenti.
- Unità UG3, è costituita da ammasso roccioso in maggioranza tettonizzato, da molto disturbato a parzialmente destrutturato-brecciato.

La Figura 8 riporta il profilo stratigrafico del versante nella sezione di massima pendenza:

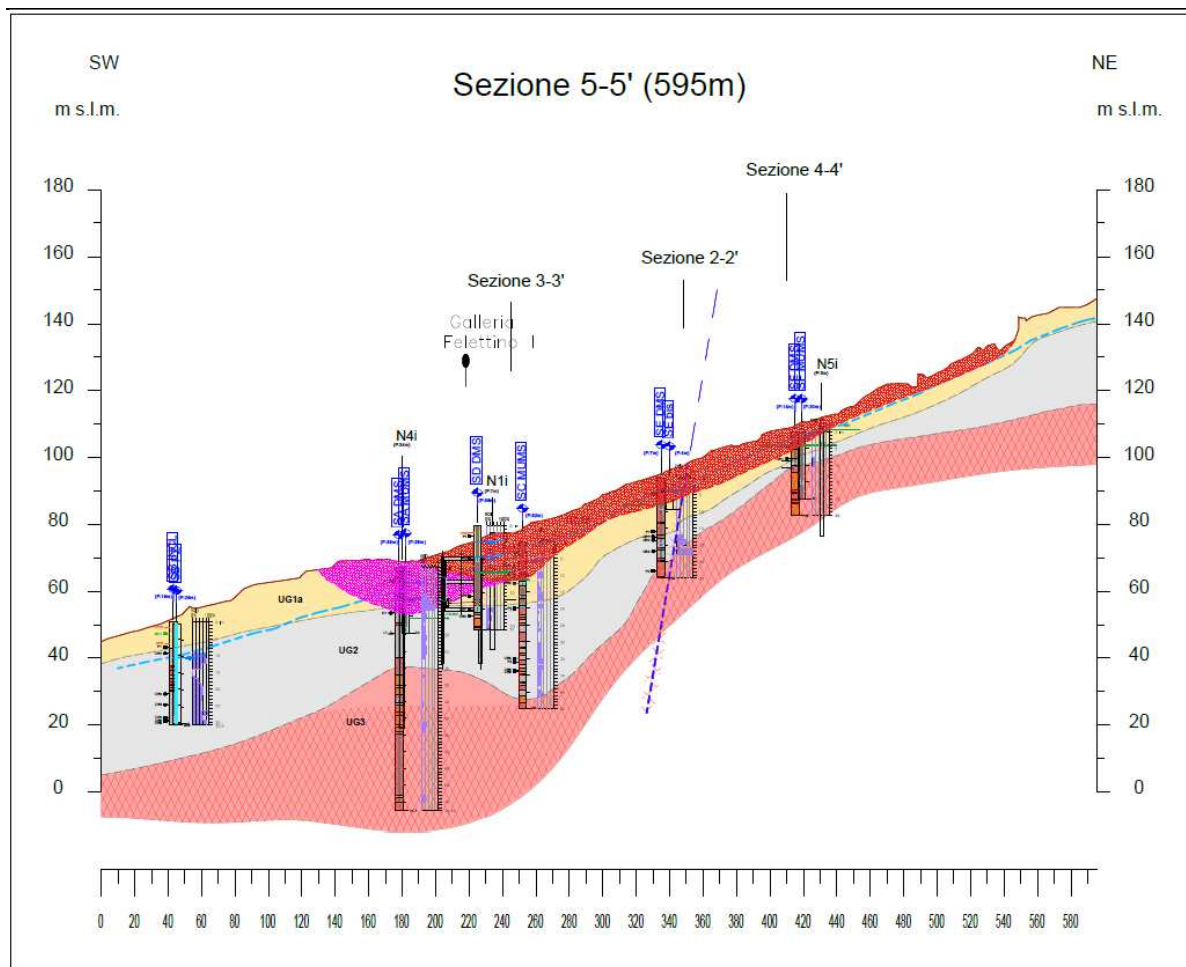


Figura 8 Sezione geotecnica 5-5', ricostruita lungo la massima pendenza del versante nel settore identificato in frana. Con la campitura puntinata rossa è indicata l'area in frana riconosciuta come certa, con la campitura puntinata magenta l'area in frana riconosciuta come incerta, entrambe ricadenti nell'unità UG1b, in giallo l'unità UG1a (non in frana), in grigio l'unità UG2 e in rosso l'unità UG3

La **Tabella 1** riporta le caratteristiche meccaniche e idrauliche delle differenti unità geotecniche individuate:

Unità Geotecnica	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$c'$ (kPa)	E (MPa)	k (m/s)
UG1b	20,0	19,0	5,0	15,0	1,00E-05
UG1a	20,0	22,0	10,0	50,0	1,00E-06
UG2	24,0	--	--	600,0	1.,00E-07
UG3	24,0	--	--	100,0	1,00E-06

**Tabella 1:** Parametri meccanici delle unità geotecniche del Versante di Carozzo

È importante sottolineare che la caratterizzazione meccanica e idraulica dei terreni del corpo di frana del versante Carozzo è stato oggetto di specifiche retro-analisi che partendo dai dati inclinometrici e



piezometrici monitorati nel corso dell'ultima campagna geognostica hanno permesso la creazione di un complesso e strutturato modello 3D per la simulazione dei movimenti del versante (caratterizzazione geotecnica, doc [7]) e per la ricreazione delle fluttuazioni stagionali osservate in sito (caratterizzazione idrologica dell'ammasso, per la quale si rimanda allo specifico elaborato 'Relazione sul modello idrogeologico del Versante di Carozzo').

I risultati delle simulazioni per la caratterizzazione meccanica sono parte integrante del modello geotecnico utilizzato e sono riportati in **Tabella 1**.

Le conclusioni di uno studio idrogeologico eseguito conducono localmente a valori di permeabilità per la formazione UG1b (e dunque per i terreni del corpo di frana) lievemente più bassi di quelli assunti nel modello geotecnico proposto e che derivano da prove Lefranc condotte in prossimità dell'area in studio nelle fasi della Progettazione di PD e PE. In via cautelativa, si è deciso di mantenere i valori ipotizzati nel modello geotecnico, soprattutto allo scopo della valutazione delle portate filtranti nel pendio e dunque del dimensionamento delle opere di drenaggio che saranno disposte a stabilizzazione della frana.

## 5. GLI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEL VERSANTE

Gli interventi di consolidamento che sono stati individuati e progettati per il versante in frana consistono nella realizzazione di drenaggi a gravità in corrispondenza del piede del versante (proprio a tergo del paramento di monte della tratta in artificiale della galleria "Felettino I") e del suo coronamento, e in una batteria di pozzi drenanti nella zona centrale del versante.

La Figura 9 illustra la distribuzione degli interventi sul versante.

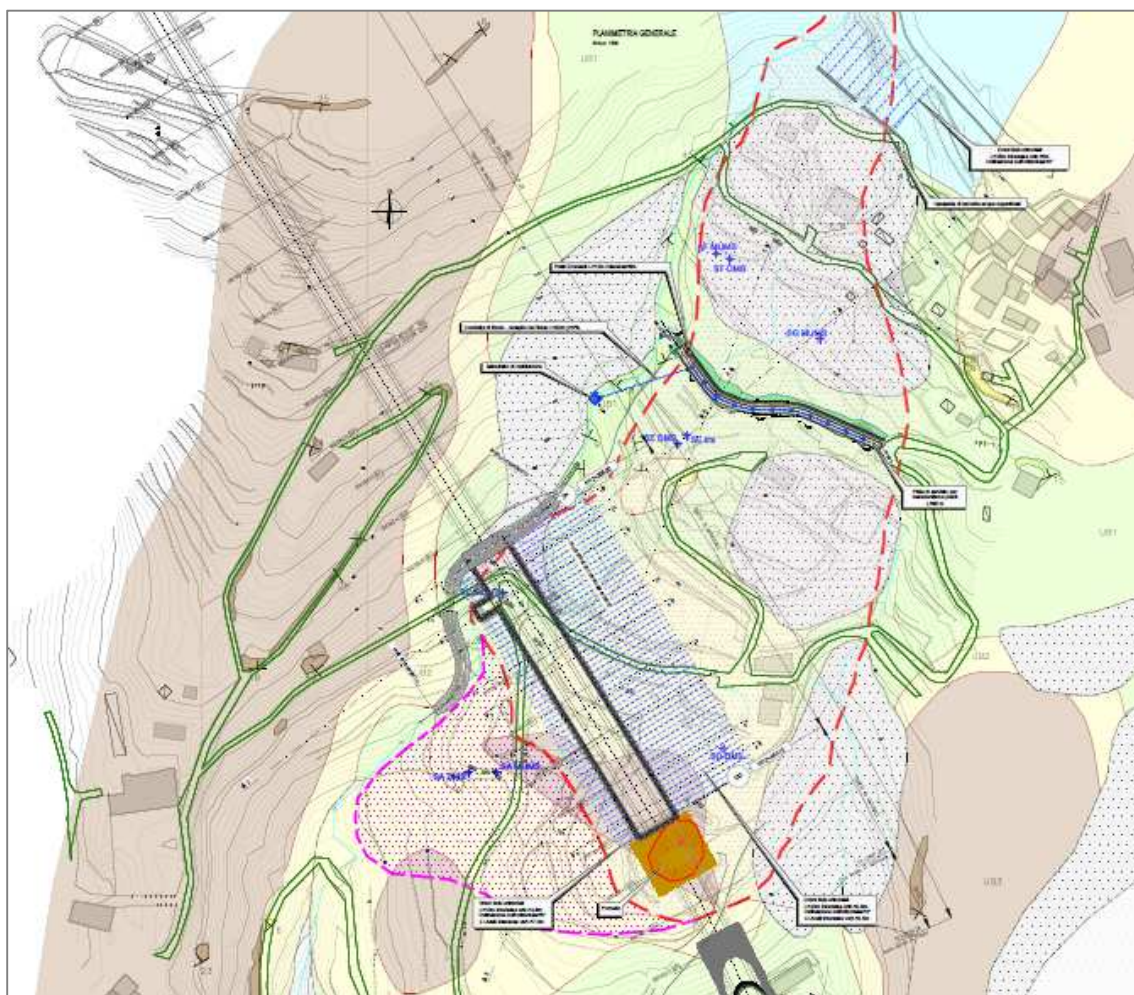


Figura 9 Planimetria degli interventi di drenaggio sul versante di Carozzo

### 5.1 I drenaggi a gravità

Il sistema drenante in corrispondenza del paramento di monte della GA è costituito da quattro livelli di dreni sub-orizzontali di lunghezza pari a 40 m, interasse orizzontale di 4,8 m e interasse verticale di circa 4 m. L'intervento, al massimo dell'efficienza, consente di abbattere il livello di falda al di sotto della superficie di scorrimento, garantendo la stabilizzazione del versante nella zona del piede. Le

acque intercettate dai dreni scaricano direttamente all'interno della galleria, vengono raccolte in apposita canaletta sagomata in corrispondenza del solettone di base della struttura e, infine, sono smaltite nel corpo recettore.

Al fine di garantire la stabilità anche del corpo del versante a valle della GA, sono previsti due livelli di drenaggi anche sul paramento di valle della galleria; in questo caso di lunghezza inferiore e pari a 10 m.

La Figura 10 riporta una sezione della galleria artificiale con la rappresentazione degli interventi di drenaggio:

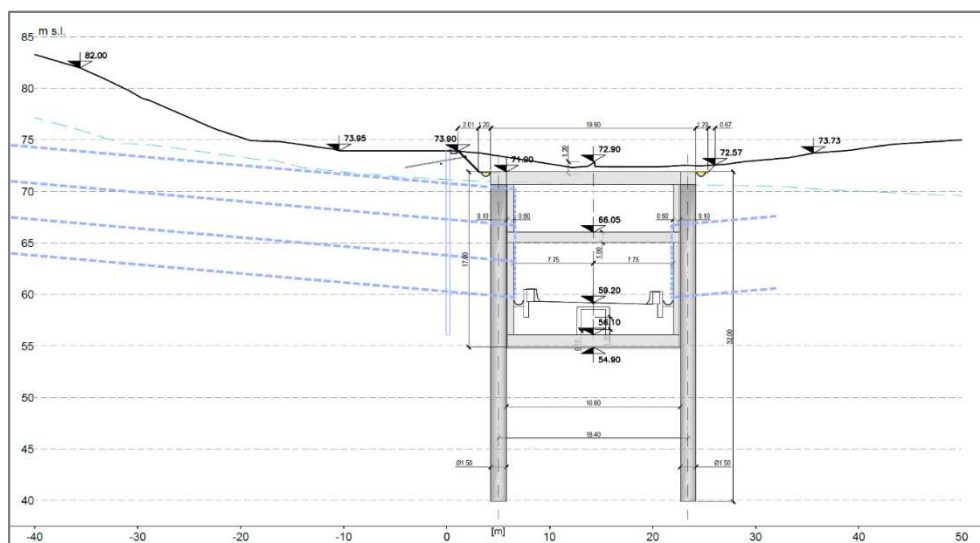


Figura 10 Interventi di consolidamento del versante Carozzo in corrispondenza della GA 'Felettino I': drenaggi a gravità

A monte del versante, in corrispondenza del coronamento di frana, sarà realizzata una fila di dreni sub-orizzontali di lunghezza  $L=25$  m, interasse orizzontale pari a 5m e inclinazione sull'orizzontale di  $3^\circ$ . La piccola incisione sul versante per la realizzazione dell'intervento sarà sostenuta da un muretto a gravità in pietrame cementato di altezza 1,2 m; alla cui base sarà sagomata una cunetta di raccolta delle acque scolate dai dreni che provvederà a indirizzare le acque verso il corpo recettore.

La Figura 11 riporta la sezione tipologica dell'intervento:

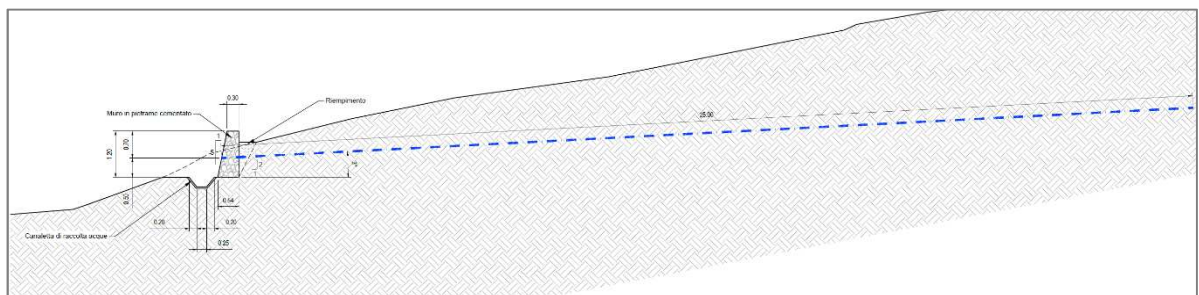


Figura 11 Interventi di consolidamento del versante Carozzo nella zona del coronamento: drenaggi a gravità

L'intervento di consolidamento mediante drenaggi a gravità consiste nella riduzione delle pressioni interstiziali del versante instabile, attraverso una serie di tubi drenanti microfessurati ad andamento sub-orizzontale. Poiché la tecnica di realizzazione di questo tipo di intervento non consente la messa in posto di una massa filtrante intorno alla fessurazione dei dreni, essa sarà protetta dall'intasamento da parte dei sedimenti a granulometria fine tramite rivestimento con geosintetici.

Le dimensioni delle fenestrate dei tubi sono funzione del tipo di terreno da stabilizzare; nel caso in esame, del Versante di Carozzo, le indagini eseguite per la caratterizzazione delle coltri interessate dai fenomeni gravitativi hanno messo in evidenza la presenza di materiali con varietà di dimensioni dei grani dal limo fino alla sabbia limosa; in questo caso, dunque si possono applicare tubi con fessure di spessore pari a 0,2 – 0,4 mm.

Per evitare che il sistema perda nel tempo la sua efficacia, per colmamento, incrostazioni o deterioramenti vari, è importante eseguire una costante manutenzione. Il controllo dell'efficienza del sistema drenante può essere effettuato tramite il censimento periodico dei dreni secchi e la sorveglianza della portata totale dello scarico, in relazione alle fluttuazioni stagionali della falda.

## **5.2 I pozzi drenanti ed il sistema di scarico**

La batteria di pozzi drenanti si sviluppa su una lunghezza di circa 100 m, ad una quota di 99 m s.l.m.m, nella zona centrale del versante. Essa è costituita da 7 pozzi di linea di diametro  $\Phi=1500$  mm e da 4 pozzi di manovra, anch'essi drenanti, di diametro  $\Phi=4000$  mm necessari per il montaggio in sicurezza dell'attrezzatura per la perforazione delle tubazioni di collegamento; tutti i pozzi hanno profondità pari a 12 m.

I pozzi di linea, realizzati con la tecnica di esecuzione dei pali trivellati, sono rivestiti lungo la superficie esterna da una colonna forata in lamiera ondulata zincata di acciaio di spessore 2,5 mm. Uno spessore di materiale inerte drenante di circa 20 mm è interposto tra il rivestimento interno e quello esterno, costituito da un lamierino drenante forato protetto con geosintetico di separazione. La lunghezza filtrante del pozzo è di circa 9,5 m; il fondo del pozzo è cieco e anche il primo tratto di 1 m a partire dal basso è impermeabile e realizzato in calcestruzzo. I pozzi di manovra, eseguiti mediante infissione di elementi prefabbricati cilindrici in c.a., sono resi drenanti mediante la realizzazione di giunti aperti fra elemento ed elemento.

I pozzi sono collegati da una tubazione  $\emptyset=300$  mm che corre a quote prossime a quelle del fondo dei pozzi e che consente di raccogliere le acque filtrate nei pozzi e di smaltirle al recapito finale individuato nel vallone che lambisce ad Ovest il corpo del versante. Tale tubazione viene eseguita con la tecnica della perforazione guidata ("*pilot system*") da un pozzo di manovra al successivo e successivamente intercettata dalla perforazione dei pali di linea.

Lo scarico finale del sistema drenante avviene per mezzo di una tubazione posta in opera mediante la tecnica dello spingitubo. La tubazione viene costruita per conci in c.a. prefabbricati di diametro interno pari a 1200 mm (spessore 15 cm) e viene fatta avanzare per spinta nel terreno per mezzo di un telaio di spinta, a partire da una camera di imbocco posta a valle, fino ad intercettare il pozzo di manovra terminale della serie.

Al fine di raggiungere le quote di scavo di progetto dello spingitubo e consentire l'avanzamento per spinta della tubazione è prevista la realizzazione di un manufatto che, in fase di esecuzione delle opere, consente di operare l'infissione dei conci della tubazione e, in fase definitiva, costituisce il recapito finale del sistema di drenaggio. Tale manufatto è costituito da un insieme di opere di sostegno e strutture (solette e pareti), avente un ingombro planimetrico pari a circa 30 m<sup>2</sup>.

Le opere di sostegno provvisoriale sono costituite da paratie di micropali di diametro pari a 240 mm, disposti ad interasse pari a 0,3 m e di lunghezza variabile, collegati in testa da un cordolo in calcestruzzo armato di 40 cm x 40 cm da demolire in fase definitiva. Le opere strutturali sono costituite dalla soletta di fondazione, di spessore pari a 40 cm, e dalle pareti di spessore pari a 30 cm, in maniera tale da formare una struttura scatolare. Oltre al cordolo delle paratie di micropali, in fase definitiva vengono demolite parzialmente le pareti della struttura (in particolare quella di spinta, verso il fosso), in modo da rendere del tutto non emergente da piano campagna la struttura definitiva di scarico.

La Figura 12 e la Figura 13 riportano gli schemi dell'intervento con pozzi drenanti sul versante.

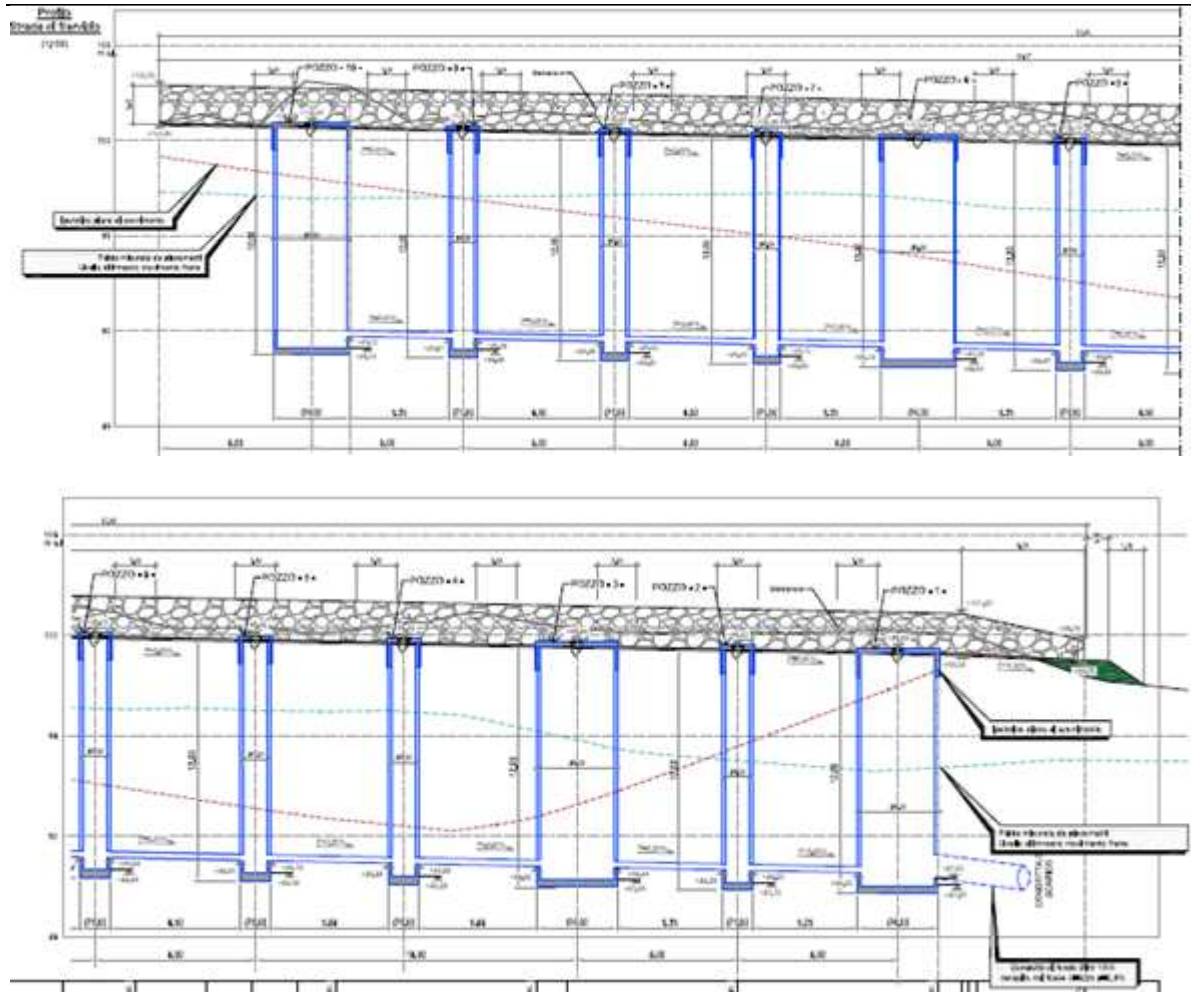


Figura 12 Sviluppata della batteria di pozzi drenanti

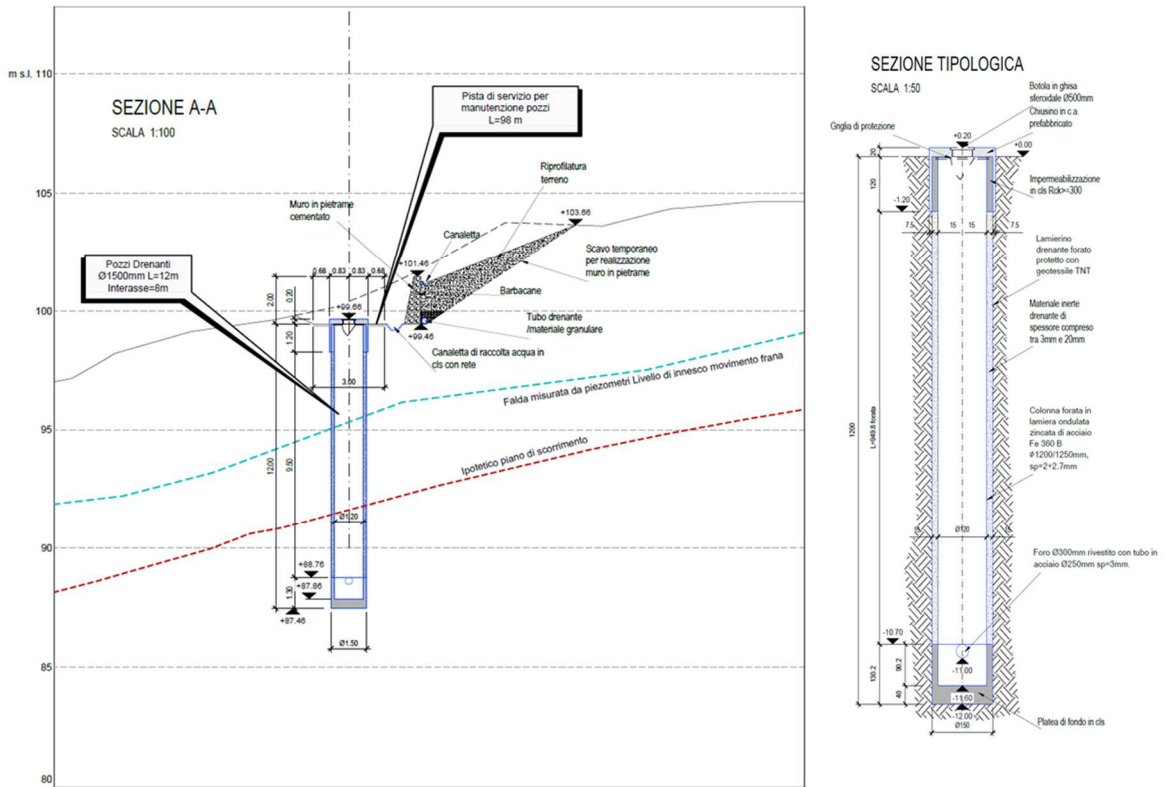


Figura 13 Pozzi drenanti – Dettaglio della pista di servizio e Sezione tipologica

## 6. I CRITERI DI PROGETTAZIONE AGLI STATI LIMITE

In accordo con quanto definito nel par. 6.2.4. del Doc. Rif.[1], per ogni Stato Limite Ultimo (SLU) deve essere rispettata la condizione

$$E_d \leq R_d \quad (\text{Eq. 6.2.1 del Doc. Rif.}[1]),$$

dove

$E_d$  è il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione, e

$R_d$  è il valore di progetto della resistenza.

La verifica della condizione ( $E_d \leq R_d$ ) deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A1 e A2), per i parametri geotecnici (M1 e M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3).

La verifica di stabilità del pendio viene eseguita, per la presenza dello scavo della galleria artificiale a valle del versante e in via cautelativa, in accordo a quanto richiesto al paragrafo 6.8.1 delle NTC 2018 deve essere effettuata secondo la Combinazione 2 (A2+M2+R2) dell'Approccio 1, tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle tabelle riproposte di seguito, per le azioni, i parametri geotecnici e le resistenze globali:

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	$\gamma_{G1}$	1.0	1.0
	Sfavorevole		1.3	1.0
Permanenti non strutturali (1)	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0.8	0.8
	Sfavorevole		1.5	1.3
Variabili	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0.0	0.0
	Sfavorevole		1.5	1.3

**Tabella 2** Coefficienti parziali sulle azioni (A1 ed A2)

PARAMETRO	Coefficiente parziale	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\gamma_{\phi'}$	1.0	1.25
Coesione efficace	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
Resistenza non drenata	$\gamma_{Cu}$	1.0	1.4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_r$	1.0	1.0

**Tabella 3** Coefficienti parziali sui terreni (M1 ed M2)

Coefficiente parziale	(R2)
$\gamma_R$	1,1

**Tabella 4** Coefficienti parziali per le verifiche di stabilità globale (R2)



Variante alla S.S.1 " Via Aurelia" Viabilità di accesso all'hub di La Spezia  
Lavori di costruzione della variante alla S.S.1 Aurelia – 3° Lotto  
2° Stralcio funzionale B dallo Svincolo di Buon Viaggio allo Svincolo di S. Venerio  
Completamento – PE

RELAZIONE DI CALCOLO GEOTECNICO

22

---

Per le verifiche sismiche si utilizzerà lo stesso approccio del caso statico ma ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a  $\gamma_R = 1,2$ .

## **7. I CODICI DI CALCOLO**

Le analisi di filtrazione per la valutazione dell'efficienza idraulica del sistema di drenaggio previsto per il versante (drenaggi a gravità e pozzi drenanti) sono state sviluppate in condizioni stazionarie grazie all'ausilio del codice di calcolo agli elementi finiti (FEM) PLAXIS 2D release 2019.0.

Le verifiche di stabilità del pendio sono state invece condotte con il codice di calcolo TALREN v5.2.5 sviluppato dalla Società Terrasol, (Montreuil Cedex, France), che implementa i metodi classici dell'equilibrio limite.

### **7.1 IL CODICE DI CALCOLO PLAXIS 2D**

Plaxis 2D è un codice di calcolo agli elementi finiti utilizzabile per eseguire analisi di stabilità e di deformazione nell'ambito di molteplici applicazioni geotecniche. Il programma permette di simulare situazioni riconducibili a condizioni di deformazione piane (plain strain) o a condizioni assialsimetriche (axisymmetric).

Il terreno è generalmente discretizzato tramite elementi triangolari a 15 nodi, disposti a generare un reticolo nodale (mesh) di calcolo opportunamente infittito nelle zone di massimo gradiente tensionale. Le paratie sono simulate tramite l'introduzione di elementi 'plate' basati sulla teoria di Mindlin, caratterizzati da rigidità flessionale (EI) ed assiale (EA). La discontinuità (e dunque il mutuo scorrimento) tra strutture e terreno è modellata tramite opportuni elementi di interfaccia, dotati di uno spessore virtuale e di una resistenza pari ad una frazione di quella del terreno naturale. Il programma consente inoltre di modellare la presenza di tiranti e relativi bulbi di fondazione, permettendo di simulare lo stato tensionale generato nel terreno dalla presenza dell'ancoraggio attivo.

Il codice consente di eseguire anche analisi di filtrazione, sia in regime stazionario che transitorio; la libreria del programma mette a disposizione dell'utente elementi già predisposti per la simulazione di drenaggi, pozzi di emungimento etc.

### **7.2 IL CODICE DI CALCOLO TALREN**

Il programma di calcolo TALREN opera secondo i metodi classici dell'equilibrio limite, e consente la valutazione del coefficiente di sicurezza di un versante in condizioni statiche e in condizioni sismiche, attraverso una verifica pseudostatica.

I metodi di calcolo utilizzati nel programma sono il metodo di Fellenius, il metodo di Bishop semplificato e il metodo sviluppato da Raulin, Rouques e Toubol. Tutti i metodi operano suddividendo il volume di terreno potenzialmente instabile in conci elementari a lati verticali e paralleli (metodi delle "strisce"). La superficie di scivolamento ipotizzata è di forma circolare per i metodi di Fellenius e di Bishop, e di forma qualsiasi per il terzo metodo. Per ciascuna delle superfici di scorrimento analizzate viene

---

valutato il valore del coefficiente di sicurezza, dato dal rapporto tra il momento stabilizzante e quello instabilizzante.

La superficie critica è quella che presenta il minimo coefficiente di sicurezza. La ricerca della superficie critica è facilitata nel programma da alcune subroutine di calcolo (ricerca automatica, griglia di centri con mesh a forma di quadrilatero, tangenti della superficie di rottura, ecc.).

I criteri di rottura per il terreno direttamente disponibili nel programma sono quello classico di Mohr-Coulomb, ovvero modelli tipo Mohr-Coulomb con coesione anisotropa o variabile con la profondità. È anche possibile definire nel piano s-t una curva di resistenza definita per punti, quindi un involucro di rottura definito tramite una spezzata con una forma qualsiasi.

È poi possibile ipotizzare una linea piezometrica di forma qualsiasi, schematizzare carichi esterni verticali o inclinati, distribuiti su una superficie o lineari lungo una retta.

## 8. LE ANALISI DI FILTRAZIONE

Per valutare l'efficienza idraulica del sistema di dreni e pozzi previsti per il versante sono state sviluppate analisi di filtrazione in condizioni stazionarie con il codice di calcolo PLAXIS2D.

Nella modellazione FEM è stata considerata la sezione longitudinale lungo la linea di massima pendenza del versante; è stata riprodotta la stratigrafia del modello geotecnico presentato al capitolo 4.3 e sono state assunte le seguenti ipotesi:

- I terreni sono stati modellati con legge costitutiva elastica, i parametri di rigidità e di permeabilità utilizzati sono quelli riportati al par.4.3.
- Le condizioni iniziali sono idrostatiche con lama d'acqua al piano campagna.
- I drenaggi a tergo della parete di monte della galleria artificiale sono stati modellati con gli elementi 'drain' che simulano la condizione di annullamento delle pressioni neutre lungo l'intero sviluppo dell'elemento lineare.
- I pozzi drenanti a metà versante sono stati modellati con elementi di volume di spessore pari al diametro interno del pozzo ( $\varnothing=1200$  mm); le pareti verticali filtranti sono state simulate con elementi 'drain' per l'annullamento delle pressioni neutre, mentre l'ultimo metro del pozzo e il fondo sono stati imposti come impermeabili. Il carico idraulico all'interno del pozzo è stato fissato alla quota di -10m da p.c..
- I dreni in corrispondenza del coronamento del versante non sono stati modellati, in quanto troppo prossimi ai bordi del modello; l'effetto sull'abbattimento della superficie freatica, nell'ipotesi di perfetta efficienza degli elementi, è stata gestita attraverso la regolazione della condizione al contorno sul bordo di monte del modello.

La Figura 14 riporta il modello numerico utilizzato per le analisi e la Figura 15 mostra l'andamento della superficie freatica per un'efficienza al 100% degli interventi del sistema drenante predisposto sul pendio.

L'effetto degli interventi garantisce dell'abbattimento della falda al di sotto della superficie di scorrimento per l'intero sviluppo del corpo di frana, e si approfondisce all'ultimo livello dei drenaggi in corrispondenza della galleria artificiale al piede del versante.

Il risultato, in termini di andamento della superficie freatica, verrà utilizzato per le analisi di stabilità del versante condotte con i metodi all'equilibrio limite (codice di calcolo TALREN) esposti nei capitoli a seguire.

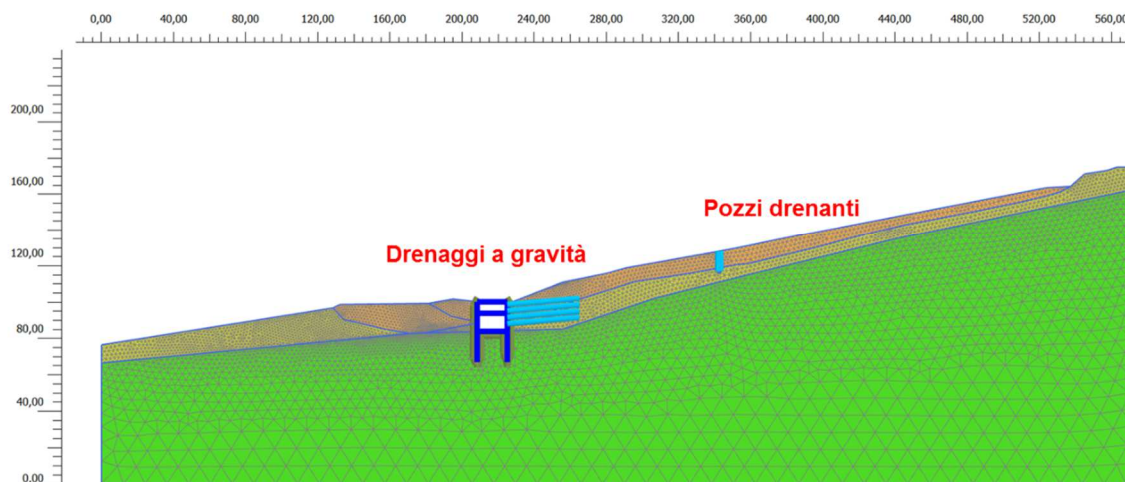


Figura 14 Modello geometrico e reticolo nodale del versante in frana con gli interventi di consolidamento previsti

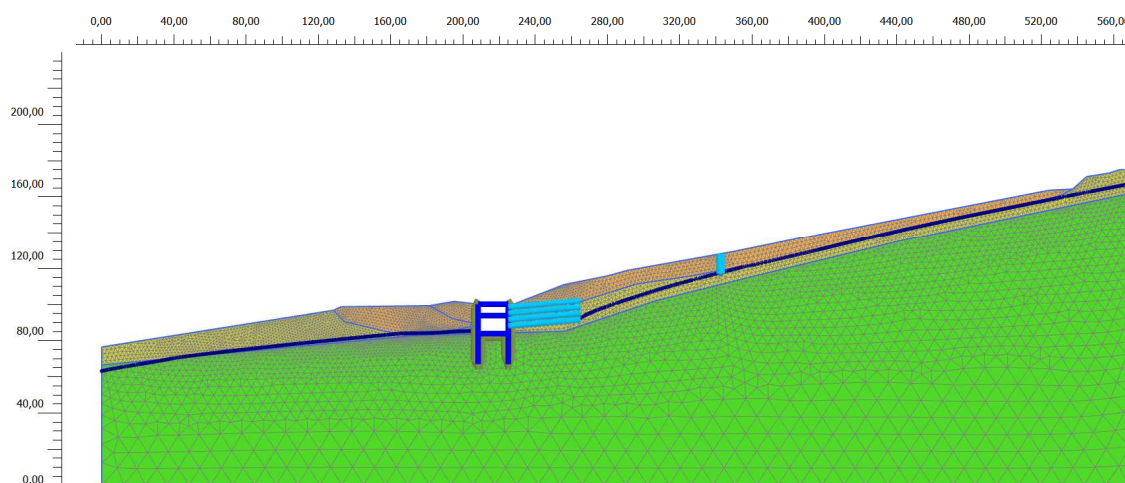


Figura 15 Risultati dell'analisi di filtrazione – andamento della falda freatica a valle dell'attivazione degli elementi drenanti

## 9. LE VERIFICHE DI STABILITA'

Le verifiche di stabilità del versante, a valle della realizzazione delle opere di consolidamento progettate, sono state condotte con il codice di calcolo TALREN, che opera con i classici metodi dell'equilibrio limite.

Nel codice di calcolo è stata simulata la sezione longitudinale del pendio secondo la direzione di massima pendenza; è stata modellata la stratigrafia del modello geotecnico presentata al capitolo 4.3, e sono assunti i parametri geotecnici presentati in **Tabella 1**. In via cautelativa, tuttavia, alla formazione UG1b è stato attribuito un valore di coesione pari a zero.

L'analisi è stata condotta secondo la combinazione A2+M2+R2 che richiede, oltre all'abbattimento dei parametri geotecnici caratteristici, il conseguimento di un fattore di sicurezza nei confronti della stabilità globale pari ad almeno 1,10.

La verifica è stata condotta sia in condizioni statiche che in condizioni sismiche.

L'analisi in condizione sismica è eseguita mediante il metodo pseudostatico, ovvero l'azione sismica viene rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale alle masse coinvolte e simulata da una accelerazione aggiuntiva a quella di gravità.

I coefficienti sismici orizzontale e verticale sono stati assunti pari a:

$$k_h=0,045$$

$$k_v=0,023$$

Tali coefficienti sismici sono stati determinati considerando cautelativamente una categoria di sottosuolo di tipo B in luogo della categoria di sottosuolo di tipo A definita mediante le prove geofisiche riportate nel doc [3]. Tale scelta progettuale risulta cautelativa e a favore di sicurezza.

Nell'analisi è stato simulato l'alleggerimento al piede dovuto allo scavo della galleria artificiale mediante la creazione di un materiale che avesse perso dell'unità di volume nullo.

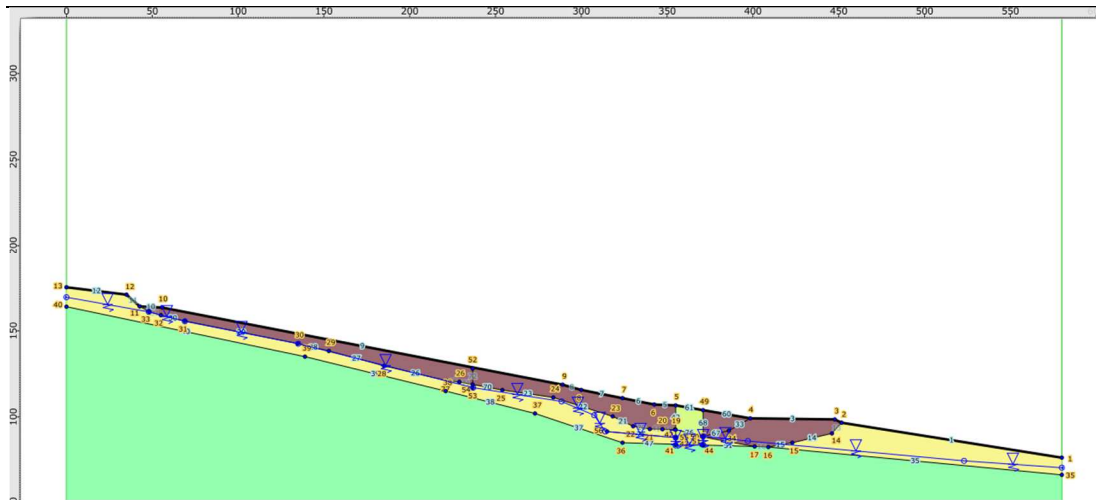


Figura 16 Analisi di stabilità del versante – Modello di calcolo 2D

I calcoli sono stati condotti con due metodi di calcolo differenti:

1. Metodo di Bishop: la rottura in questo caso si sviluppa secondo superfici di scorrimento circolari, assimilabili a superfici di neoformazione;
2. Metodo delle Perturbazioni: è il metodo di risoluzione all'equilibrio limite implementato nel codice di calcolo TALREN per eseguire la valutazione del coefficiente di sicurezza su superfici non circolari, di forma e sviluppo stabilite arbitrariamente dall'utente. In questo caso la superficie presa in esame è quella di contatto tra le formazioni UG1b e UG1a, ovvero la superficie di scorrimento rilevata in sito durante l'ultima campagna geognostica.

Per maggiori informazioni circa i metodi di risoluzione della libreria TALREN si rimanda al manuale del codice di calcolo (cif. [9]).

Le figure in basso riportano la sezione di analisi e i risultati delle verifiche per il calcolo statico e per il calcolo sismico.

I valori del coefficiente di sicurezza sono sempre superiori a 1,10 per il caso statico e a 1,2 per la condizione sismica; per cui i livelli di falda garantiti dagli interventi di drenaggio consentono il soddisfacimento delle verifiche di stabilità del versante.

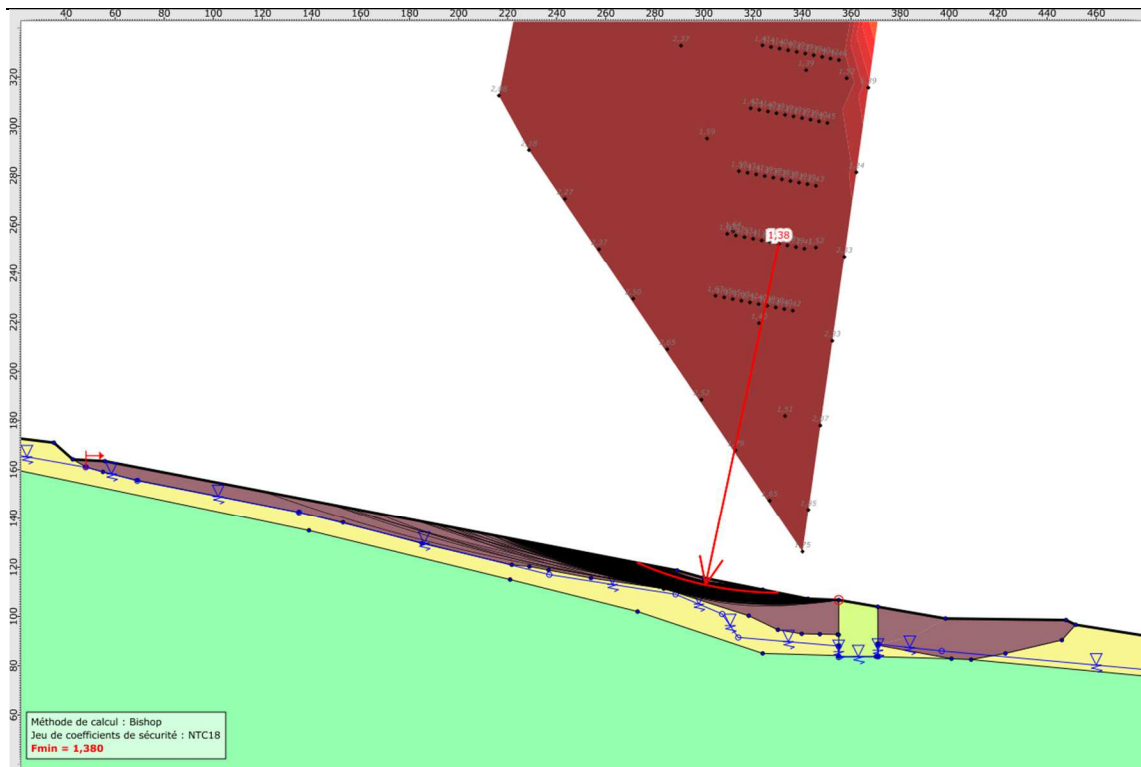


Figura 17 Analisi di stabilità del versante con interventi di drenaggio -Condizione statica – Metodo di calcolo di Bishop – Rappresentazione delle superfici di scorrimento comprese tra il valore minimo del coefficiente di sicurezza, FS = 1,38, e il valore FS =1,45

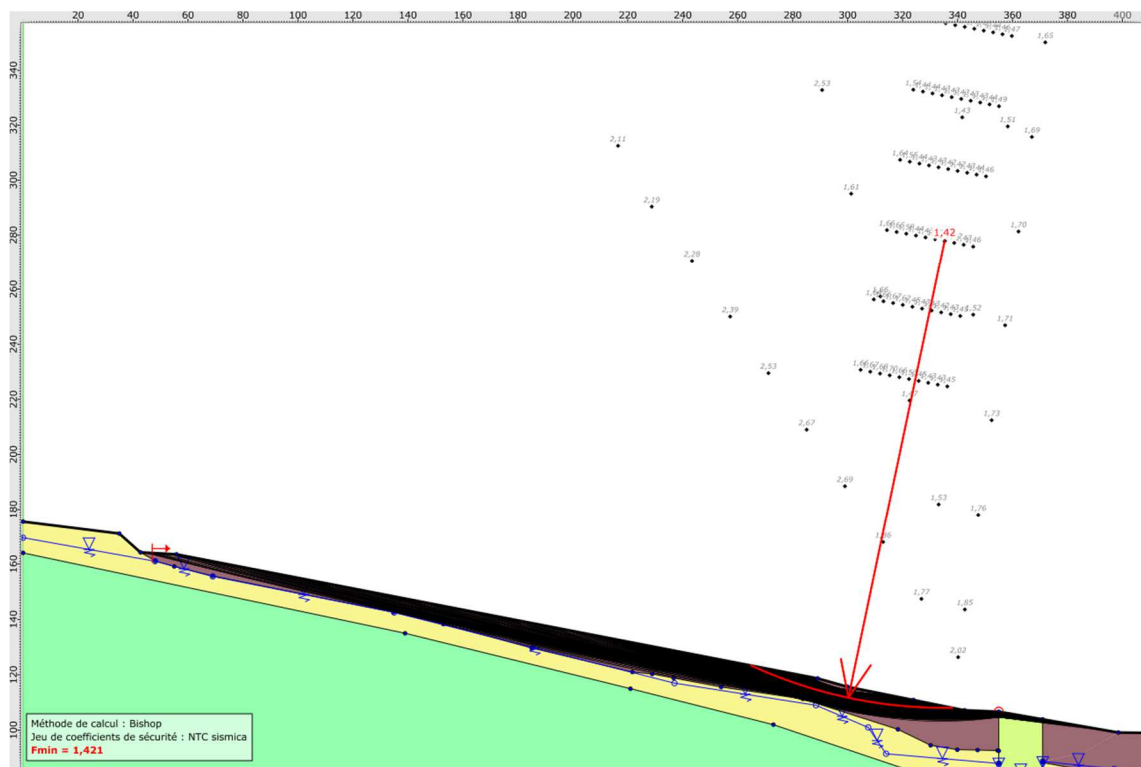




Figura 18 Analisi di stabilità del versante con interventi di drenaggio -Condizione sismica – Metodo di calcolo di Bishop – Rappresentazione delle superfici di scorrimento comprese tra il valore minimo del coefficiente di sicurezza, FS = 1,42 e il valore FS = 1,50

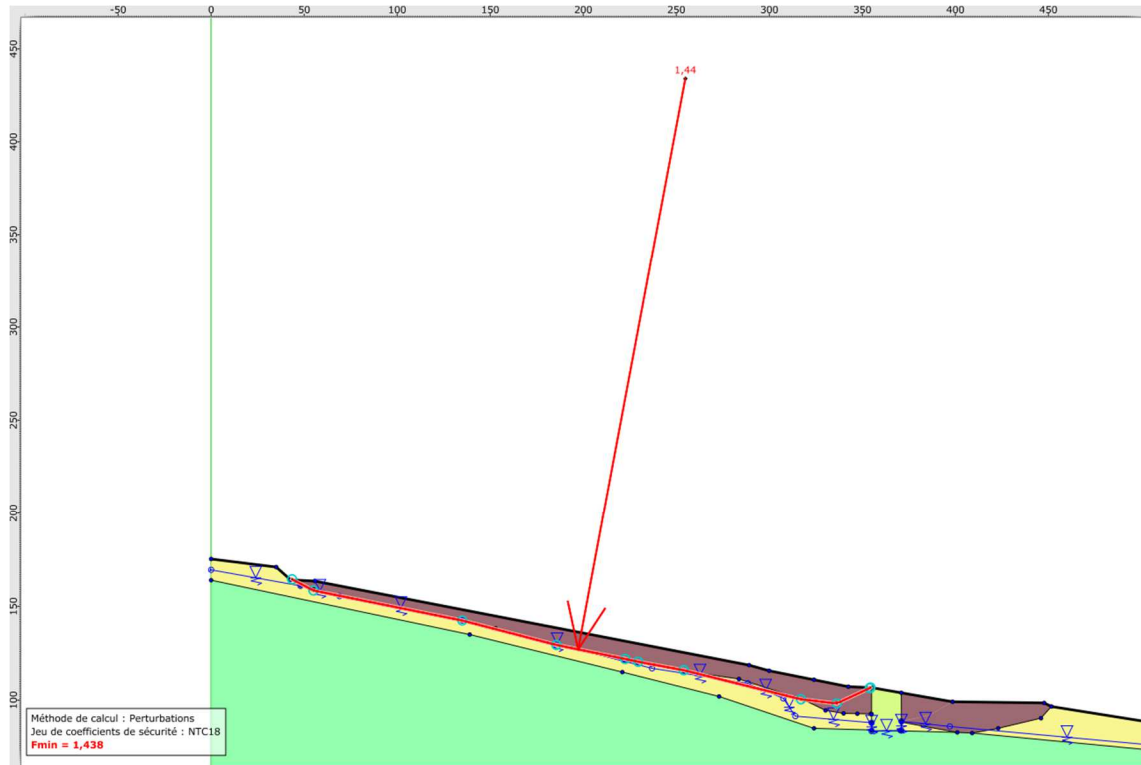


Figura 19 Analisi di stabilità del versante con interventi di drenaggio -Condizione statica – Metodo di calcolo delle Perturbazioni – Coefficiente di sicurezza sulla pregressa superficie di scorrimento FS = 1,46



Variante alla S.S.1 " Via Aurelia" Viabilità di accesso all'hub di La Spezia  
Lavori di costruzione della variante alla S.S.1 Aurelia – 3° Lotto  
2° Stralcio funzionale B dallo Svincolo di Buon Viaggio allo Svincolo di S. Venerio  
Completamento – PE

RELAZIONE DI CALCOLO GEOTECNICO

31

---

Figura 20 Analisi di stabilità del versante con interventi di drenaggio -Condizione sismica – Metodo di calcolo delle Perturbazioni – Coefficiente di sicurezza sulla pregressa superficie di scorrimento  $FS = 1,48$

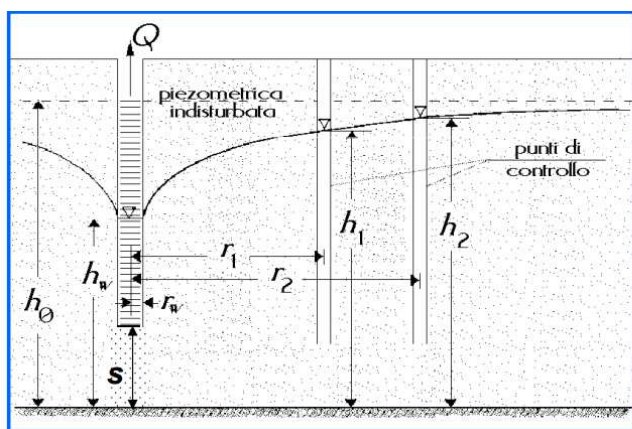
## 10. IL DIMENSIONAMENTO DELLA CONDOTTA DI COLLEGAMENTO DEI POZZI

Come descritto nel capitolo dedicato agli interventi di drenaggio sul versante, i pozzi drenanti sono collegati da una tubazione  $\varnothing=300$  mm che corre trasversalmente al pendio e che consente di raccogliere le acque filtrate e di smaltirle al recapito finale individuato nel vallone che lambisce ad Ovest il corpo del versante.

Il dimensionamento della tubazione è stato eseguito tenendo conto dei risultati delle analisi di filtrazione condotte con il codice PLAXIS2D ed eseguendo un controllo con il metodo analitico di Dupuit, parametrizzato sul valore di permeabilità dei terreni.

### 10.1 Le portate filtranti con le formulazioni analitiche

La portata filtrante nel singolo pozzo è stata stimata attraverso le formulazioni analitiche specifiche per gli emungimenti; nello specifico è stata utilizzata la formulazione valida per il pozzo parzialmente ancorato in falda freatica:



$$Q \cong \pi \cdot k \frac{(h_0 - s)^2 - (h_w - s)^2}{\ln \frac{R}{r_w}} (1 + A)$$

$A =$  fattore di forma

$$A \cong \left( 0.3 + \frac{10r}{h_2} \right) \sin \frac{1.8s}{h_2}$$

$R =$  raggio di influenza del pozzo

In cui:

$h_0 =$  carico idraulico iniziale nel pozzo imposto pari a piano campagna;

$h_w =$  carico idraulico nel pozzo nella condizione stazionaria, imposto a -10m da p.c.;

$h_2 =$  carico idraulico in punto di controllo; in questo caso esso è stato assunto pari al valore di  $h_0$  in corrispondenza del raggio di influenza  $R$ ;

$s =$  distanza tra la base del pozzo e il substrato impermeabile; in questo caso la profondità del substrato impermeabile è stata imposta al contatto con lo strato UG2;

$R =$  raggio d'influenza del pozzo, calcolato secondo l'espressione di Sichard

$$R = C \cdot \Delta H \cdot \sqrt{k}$$

Dove  $\Delta H$  rappresenta l'abbattimento di carico idraulico prodotto dal pozzo espresso in metri,  $k$  è il coefficiente di permeabilità (m/s), e  $C$  è una costante empirica che nel caso del pozzo singolo assume valore pari a 3000 e nel caso di una fila pozzi si assume variabile tra 1500 e 2000, in questo caso è stato assunto pari a 2000.

I calcoli sono stati eseguiti per tre valori del coefficiente di permeabilità:

1.  $k=1,00E-05$  m/s; valore di permeabilità attribuito nella caratterizzazione geotecnica alla formazione in frana (unità geotecnica UG1b);
2.  $k=1,00E-06$  m/s; valore di permeabilità attribuito nella caratterizzazione alla formazione UG1a
3.  $k=3,00E-05$  m/s; valore di permeabilità desunto dall'unica prova Lefranc eseguita nei terreni di copertura, sebbene in un foro di sondaggio esterno all'area di frana;

I risultati dei calcoli sono riportati nella tabella in basso:

Permeabilità $k$ [m/s]	Portata filtrante nel singolo pozzo $Q$ [l/s]	Portata filtrante negli 11 pozzi $Q$ [l/s]
1,00E-05	1,15	12,7
1,00E-06	0,16	1,7
3,00E-05	3,08	33,8

**Tabella 5** Risultati dei calcoli analitici di filtrazione nei pozzi

## 10.2 Le portate filtranti nel modello FEM2D

Le analisi di filtrazione condotte con il codice di calcolo PLAXIS2D per la condizione stazionaria restituiscono un valore di portata filtrante nei pozzi, espressa a metro lineare, pari a

$$q = 0,17 \text{ m}^3/\text{giorno}/\text{m}$$

Considerando che lo sviluppo della disposizione degli 11 pozzi previsti è pari a circa 100 m, la portata totale affluente nei pozzi nella condizione stazionaria è pari a:

$$q = 17 \text{ m}^3/\text{giorno} \sim 20 \text{ l/s}$$

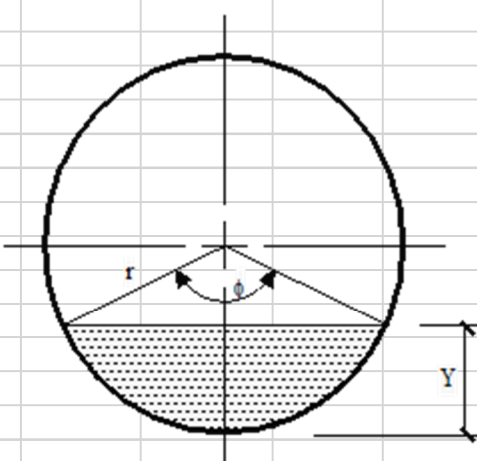
Rispetto ai calcoli analitici i valori restituiti dalle analisi FEM sono più bassi, evidentemente per l'influenza delle condizioni al contorno (limite di bordo superiore che simula la presenza dei drenaggi sul coronamento del versante, e presenza a valle dei pozzi dei dreni a tergo della galleria artificiale) che riducono il dislivello idraulico che innesca il fenomeno di filtrazione nel pozzo.

### 10.3 Il dimensionamento della condotta

Ai fini del dimensionamento della condotta di scarico delle portate dei pozzi nel corpo recettore del vallone si è tenuto conto del valore massimo di portata desunto dei calcoli, ovvero  $q=34$  l/s.

Di seguito si riportano le verifiche.

Diametro esterno:	306	mm
Spessore:	3	mm
Diametro interno:	0,300	m
Pendenza	0,020	
Coeffic. di Bazin	0,10	

N°	Y (m)	f (rad)	A (mq)	%	C (m)	R (m)	c (√m/secq)	Q/√i (mc/sec)	Q (mc/sec)	V (m/sec)
0	0,000	0,0000	0,0000	0,000	0,0000	0,0000	0,00	0,0000	0,000	0,000
1	0,015	0,9021	0,0013	0,050	0,1353	0,0098	43,24	0,0056	0,001	0,604
2	0,030	1,2870	0,0037	0,100	0,1931	0,0191	50,45	0,0256	0,004	0,985
3	0,045	1,5908	0,0066	0,150	0,2386	0,0279	54,41	0,0604	0,009	1,284
4	0,060	1,8546	0,0101	0,200	0,2782	0,0362	57,02	0,1092	0,015	1,534
5	0,075	2,0944	0,0138	0,250	0,3142	0,0440	58,91	0,1707	0,024	1,747
6	0,090	2,3186	0,0178	0,300	0,3478	0,0513	60,35	0,2437	0,034	1,933
7	0,105	2,5322	0,0220	0,350	0,3798	0,0580	61,48	0,3266	0,046	2,095
8	0,120	2,7389	0,0264	0,400	0,4108	0,0643	62,39	0,4176	0,059	2,237
9	0,135	2,9413	0,0309	0,450	0,4412	0,0699	63,13	0,5150	0,073	2,361
10	0,150	3,1416	0,0353	0,500	0,4712	0,0750	63,73	0,6168	0,087	2,468
11	0,165	3,3419	0,0398	0,550	0,5013	0,0795	64,22	0,7211	0,102	2,560
12	0,180	3,5443	0,0443	0,600	0,5316	0,0833	64,61	0,8258	0,117	2,637
13	0,195	3,7510	0,0486	0,650	0,5626	0,0864	64,92	0,9284	0,131	2,699
14	0,210	3,9646	0,0529	0,700	0,5947	0,0889	65,15	1,0264	0,145	2,747
15	0,225	4,1888	0,0569	0,750	0,6283	0,0905	65,30	1,1171	0,158	2,778
16	0,240	4,4286	0,0606	0,800	0,6643	0,0913	65,36	1,1970	0,169	2,792
17	0,255	4,6924	0,0640	0,850	0,7039	0,0910	65,34	1,2620	0,178	2,787
18	0,270	4,9962	0,0670	0,900	0,7494	0,0894	65,20	1,3063	0,185	2,757
19	0,285	5,3811	0,0694	0,950	0,8072	0,0859	64,87	1,3191	0,187	2,689
20	0,300	6,2832	0,0707	1,000	0,9425	0,0750	63,73	1,2337	0,174	2,468

$$Y = r \times \left( 1 - \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right) \quad R = \frac{A}{C} \quad C = r \times \varphi$$

$$A = \frac{r^2}{2} \times (\varphi - \sin\varphi) \quad \% = \frac{Y}{2 \times r}$$