

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile**

Tesi di Laurea Magistrale

**Rilievo e messa in sicurezza di versanti instabili con geometria
complessa: applicazione ad un caso ingegneristico**

**Survey and stabilization of unstable slopes with complex
shape: application to an engineering instance**



Relatore: Guido Musso

Correlatore: Monica Barbero

Candidato

Fabio Salomone

1 Sommario

1	Sommario.....	1
2	Introduzione.....	3
2.1	Premessa.....	3
3	Descrizione del problema.....	4
3.1.1	Inquadramento geografico dell'area.....	5
3.1.2	Interventi somma urgenza.....	10
4	Analisi morfologica del terreno.....	13
4.1	Dati di letteratura.....	14
4.1.1	I Modelli Digitali del Terreno (DTM) pubblici.....	15
4.1.2	Dati Lidar.....	17
4.1.3	Modelli digitali Differenze DEM, DTM e DSM.....	20
4.2	Strumentazione terrestre.....	20
4.2.1	Stazione totale.....	20
4.2.2	Sistemi GPS.....	21
4.3	Rilievo aerofotogrammetrico.....	22
4.3.1	Creazione della nuvola di punti.....	23
4.3.2	Creazione della nuvola di punti densa.....	23
4.3.3	Costruzione della mesh triangolare.....	24
4.3.4	Applicazione della texture.....	25
5	Quadro geologico-geotecnico dell'intero versante.....	29
5.1.1	Descrizione dell'assetto geologico generale.....	29
5.1.2	Documentazioni della casistica storica dei dissesti.....	31
5.1.3	Descrizione geomorfologica di dettaglio del sito.....	32
5.2	Sondaggi presenti nel database Arpa Regione Piemonte.....	33
5.3	Carotaggi in corrispondenza dell'evento franoso avvenuto.....	37
5.3.1	Sondaggi eseguiti nel 2003.....	45
5.4	Indagini geofisiche.....	50
5.5	Interpretazione indagine sismica a rifrazione.....	52
5.6	Velocità di propagazione delle onde P.....	53
5.7	Curva Isotache (velocità onde P).....	54
5.8	Curva Isopache prima Unità (Spessore dello strato).....	55
5.8.1	Elaborati dei singoli stendimenti.....	57
5.9	Osservazioni conclusive sulle indagini geofisiche.....	60
5.10	Lecture Inclino metriche.....	62
5.10.1	Considerazioni.....	71
6	L'evento franoso del 2017.....	72

6.1	Descrizione dell'evento	72
6.2	Condizioni topografiche e morfologiche antecedenti la frana.....	73
6.3	Ipotesi sulle cause di innesco.....	73
6.4	Caratterizzazione meccanica degli strati nell'area di frana	75
6.5	Caratterizzazione geotecnica	77
7	Interventi di ripristino morfologia del versante	80
7.1	Effettivo dimensionamento.....	85
7.2	Regimazione idraulica della terra rinforzata	88
7.2.1	Regimazione superficiale	88
7.2.2	Regimazione sub-superficiale	88
7.2.3	Pseudo-coesione	89
7.3	Stabilità generale del versante: il muro a monte della Palestra Metavia.....	90
7.4	metodologia di calcolo adottata	90
7.4.1	Metodo di Sarma	90
7.4.2	Verifica di stabilità in assenza d'acqua	92
7.4.3	Verifica di stabilità in presenza d'acqua	93
7.4.4	Verifica di stabilità in presenza d'acqua	94
7.4.5	Verifica di stabilità in presenza d'acqua e sovraccarico	95
7.4.6	Verifica di stabilità del muro di valle in assenza d'acqua.....	96
7.4.7	Muro a monte della Palestra Metavia, senza contrasti e con falda	97
7.4.8	Muro a monte della Palestra Metavia, senza contrasti e con falda	98
7.4.9	Consolidamento del Muro della Palestra Metavia	100
7.4.10	Lunghezza dei tiranti per il consolidamento del Muro della Palestra	103
7.5	Analisi del versante antecedente a intervento riprofilatura	104
7.5.1	Analisi completa con pendio senza la presenza di falda	105
7.5.2	Analisi completa con pendio con la presenza di falda e sovraccarico	106
7.5.3	Analisi completa con pendio con la presenza di falda e sovraccarico	107
7.6	Analisi del versante successivo all'intervento di riprofilatura riprofilatura	108
8	Analisi dell'intero versante	110
9	Conclusioni	115
10	Bibliografia.....	117
11	Appendice.....	118
11.1	Principi dell'interpretazione automatica delle foto aeree – Modello SIFT	118
11.2	Interpretazione indagini sismiche.....	128
12	Ringraziamenti	137

2 Introduzione

2.1 Premessa

Oggetto della presente Tesi di Laurea Magistrale è l'analisi di un versante attualmente in condizioni di precaria stabilità, sovrastante l'abitato di Mondovì e visibile da ampie parti della città.

Recentemente si sono manifestati fenomeni franosi che hanno portato alla temporanea inagibilità dell'Istituto Giolitti-Bellisario, con rilocalizzazione della popolazione studentesca ospitata presso altri complessi scolastici del Comune.

L'Amministrazione Comunale, peraltro, ha proposto la Dichiarazione di Notevole Interesse Pubblico, per cui gli interventi di mitigazione del rischio e di messa in sicurezza devono rispettare precisi parametri ambientali e paesaggistici.

Nella Tesi si analizzerà in dettaglio il percorso progettuale nel suo complesso, partendo dalle tecniche di rilievo aerofotogrammetrico utilizzate per la definizione della superficie topografica del sito, passando per le campagne di indagini geognostiche e geofisiche volte alla caratterizzazione del sottosuolo, descrivendo gli interventi di somma urgenza già messi in atto per consentire la parziale restituzione dell'agibilità al Complesso Scolastico, per concludere con una sezione in cui si ipotizza un possibile approccio progettuale per la messa in sicurezza dell'intero versante e la contestuale restituzione dell'area alla Cittadinanza come parco aperto alla pubblica fruizione.

Ciascun argomento sarà affrontato premettendo una approfondita trattazione teorica delle metodologie di calcolo, tralasciando gli approcci più convenzionali e noti per concentrarsi invece sulle tecniche numeriche più recenti ed in genere meno approfondite nei Corsi Universitari.

A tale trattazione saranno associati i relativi calcoli, applicati alle reali condizioni del sito, così da conseguire un elaborato a tutti gli effetti paragonabile ad un progetto realmente applicabile al caso in oggetto.

3 Descrizione del problema

Mondovì è un comune italiano situato in Piemonte più precisamente nella parte sud della provincia di Cuneo. Il comune è suddiviso in due centri principali: Mondovì Alta e Mondovì bassa, il primo borgo nato in epoca medioevale è ubicato in sommità al Monte Regale (rilevato che sovrasta tutto il territorio comunale), mentre il secondo più moderno è posto ai piedi, lungo il corso del torrente Ellero.

Tra il culmine del Monte Regale (560 m.s.l.m) e la pianura sottostante (400 m.s.l.m) vi è un dislivello di circa 160 m per una distanza longitudinale di circa 400-500 m, infatti il versante è piuttosto acclive con una pendenza media di circa 37,5 % ovvero 22°. Questo fa sì che localmente si possono verificare dei fenomeni di instabilità.

Nell'immagine seguente è raffigurata la città vecchia con il versante adiacente in esame.



Fig.3.1 - Immagine panoramica del Monte Regale

Un effettivo riscontro delle problematiche del versante dell'altura è avvenuto nei giorni 29 e 30 dicembre 2017; in cui un evento franoso sul fianco occidentale del rilevato è andato a lesionare parte dell'edificio che ospita l'istituto scolastico G. Giolitti ed ha interessato la sottostante palestra.

3.1.1 Inquadramento geografico dell'area

L'area in cui si è sviluppata la frana e il versante che si vuole esaminare ricade nel comune di Mondovì per un'area di circa 0,18 km² con esposizione NO, compresa tra 400 e 550 m s.l.m., individuata dal foglio "227 NO"

La zona in esame in coordinate UTM è compresa tra:

$$406200 < X < 406750$$
$$4915800 < Y < 4916300$$



Fig. 3.2 – Cartografia della regione Piemonte

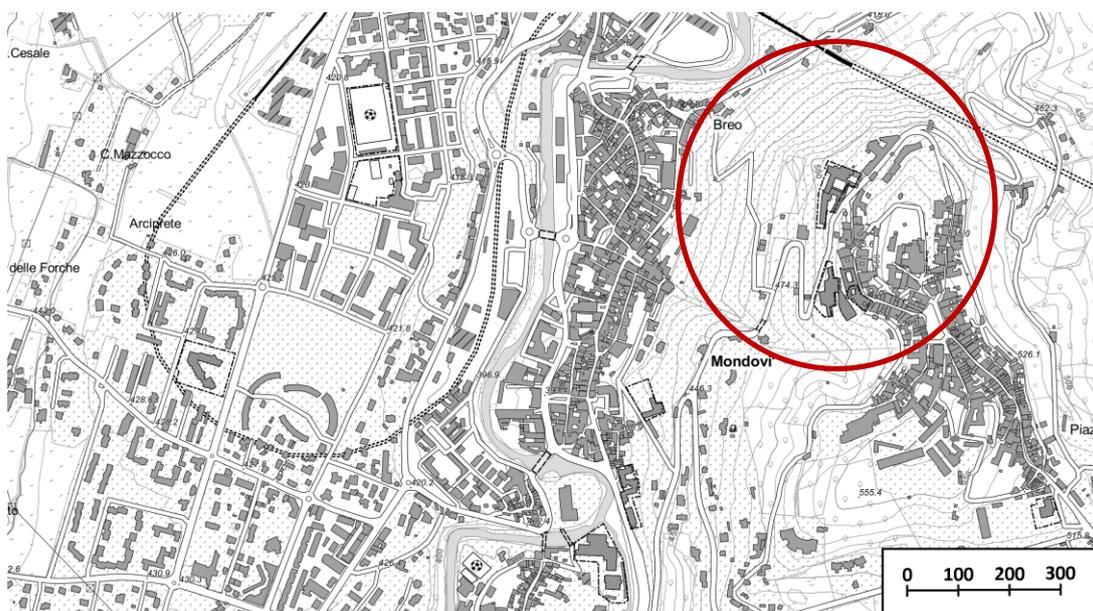


Fig. 3.3 - Estratto della C.T.R. in scala 1:10'000 ("227020" da 227 NO)

Nelle figure successive (3.3 - 3.4 - 3.5 - 3.6) sono riportate un inquadramento più dettagliato dell'area in esame.

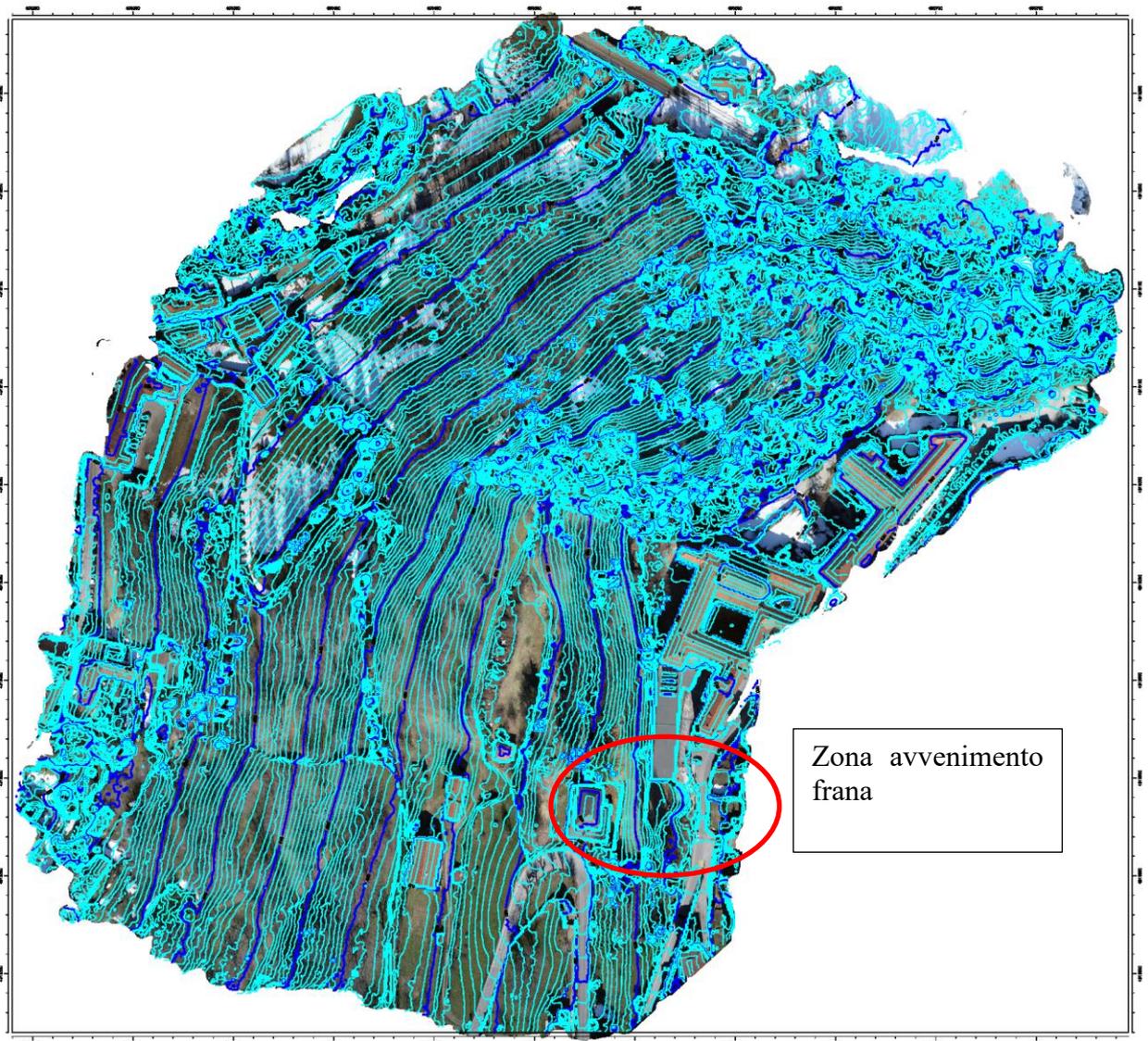


Fig. 3.4 – Rilievo e ortofoto versante

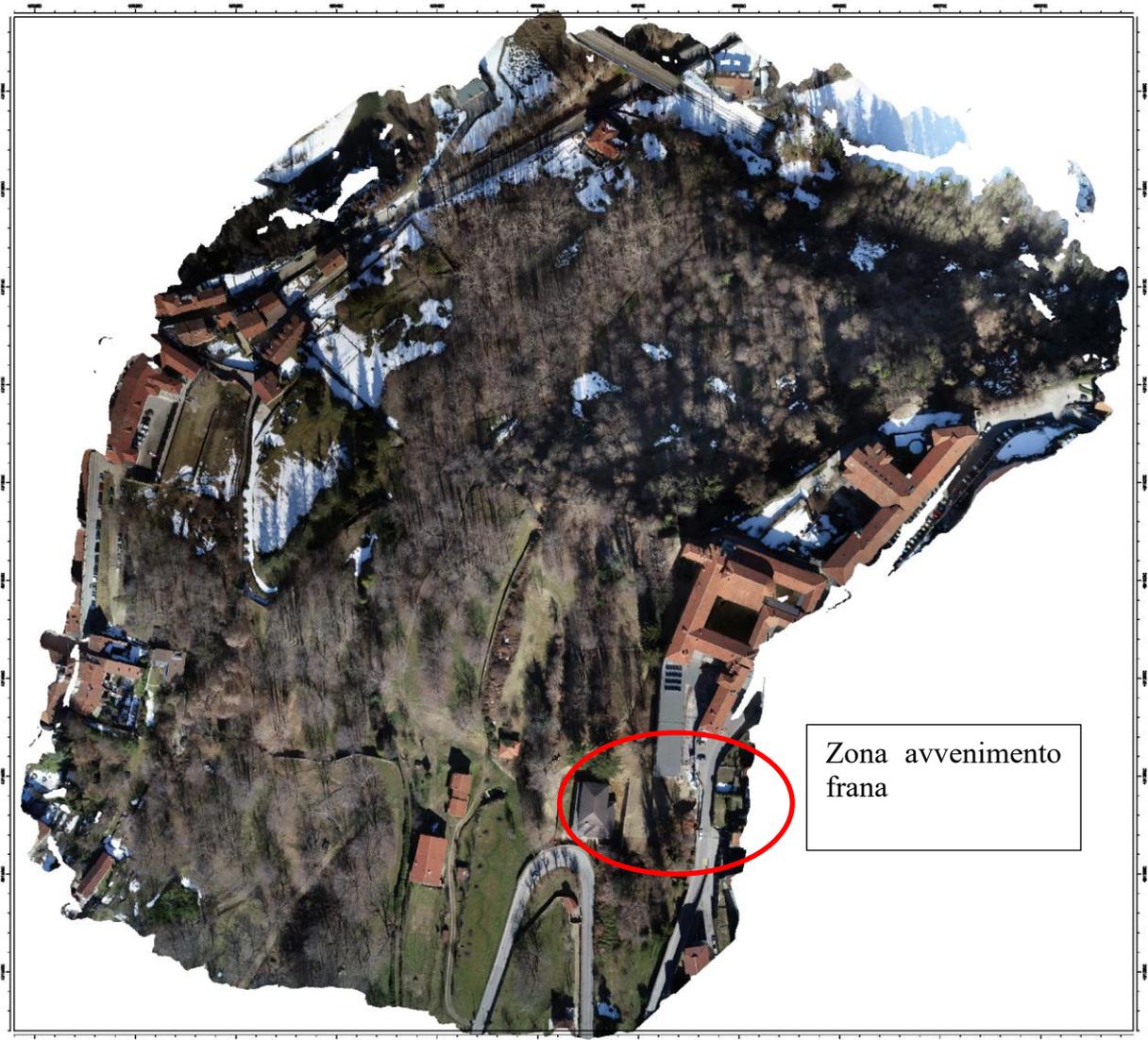


Fig. 3.5 – Ortofoto versante



Fig. 3.6 – Ricostruzione versante



Fig.3.7 – Ricostruzione zona dove è avvenuta la frana

Nella figura 3.7 sono riportati gli interventi di contenimento.

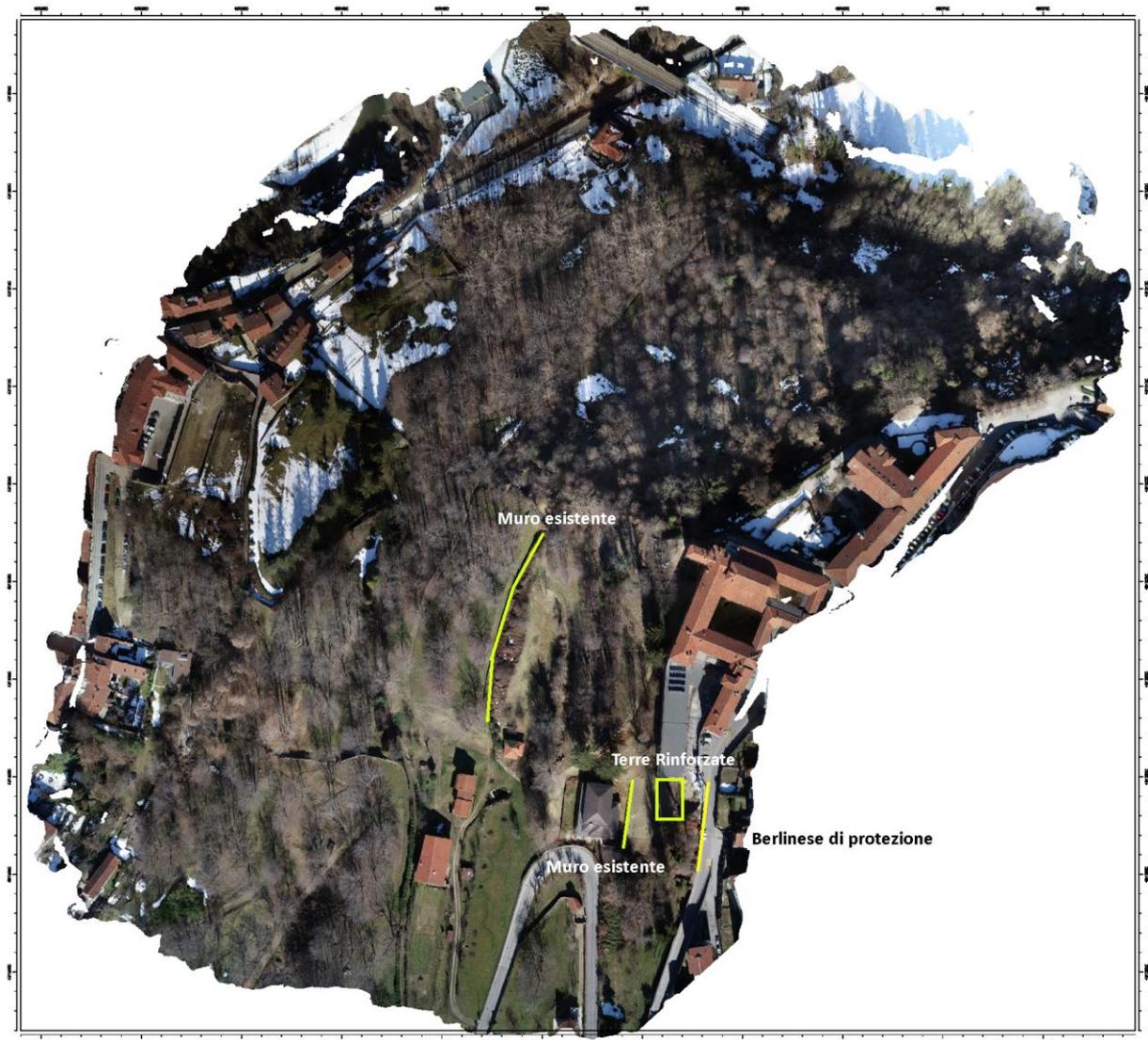


Fig.3.8 – Ortofoto con interventi esistenti

3.1.2 Interventi somma urgenza

Sono riportati sinteticamente i primi interventi eseguiti in somma urgenza a seguito del movimento dal Progettista, Ing. Geol. Massobrio [1]:

A seguito del movimento dissestivo la Via E. Tortora, benchè solo marginalmente interessata dal fenomeno la cui nicchia di distacco dista circa 4-5 m, è stata chiusa al traffico veicolare mediante la posa in opera di barriera di sicurezza, consentendo così il solo transito pedonale.

Tale Via riveste un carattere strategico per il Rione Piazza in quanto permette ai mezzi pubblici il trasporto degli studenti agli edifici scolastici presenti nell'area.

È, pertanto, necessario, alla luce degli eventi avvenuti, procedere con un primo intervento di messa in sicurezza della viabilità pubblica che permetta sia l'apertura parziale della via al traffico veicolare (su un senso di marcia) sia la possibilità di procedere, nel caso, con la rimozione dei materiali di frana accumulatisi sul versante (demolizione delle strutture in dissesto, disgaggio dei materiali a tergo della palestra, ecc.).

Si può ipotizzare d'intervenire mediante la realizzazione di un cordolo in c.a. 100 cm x 100 cm sottofondato a mezzo n°9 pali trivellati di lunghezza pari a 15.00 m ed interasse di circa 1.70 m successivamente ancorato con n°7 tiranti attivi in c.a.p. della lunghezza di 15.00 m (10.00 m di bulbo e 5.00 m liberi).

Il cordolo stradale avrà una lunghezza complessiva pari a circa 15 m.

Prima della realizzazione del cordolo in c.a. dovranno essere realizzati gli interventi di consolidamento (tiranti e pali di fondazione).

I pali saranno realizzati mediante trivellazione del diametro 600 mm successivamente armati con gabbie metalliche. La lunghezza minima, prevista per i pali è di 15.00 m (in totale i pali saranno n°9) per garantire un efficace immorsamento nel substrato compatto che dovrà essere individuato in fase esecutiva.

Il cordolo sarà ancorato, mediante la realizzazione di n°7 tiranti in c.a.p. a capacità di 45 t (n°3 trefoli) con lunghezza di circa 15 m ed interasse di circa 2.50 m (10 m d'ancoraggio e 5 m liberi).

Dopo la realizzazione del cordolo in c.a.p. si procederà al ritombamento dell'area fino alle quote di piano strada, Il tutto come illustrato nelle tavole progettuali allegate alla presente.

4 Analisi morfologica del terreno

Per affrontare in modo tecnicamente corretto le problematiche idrogeologiche, tra le quali la mitigazione del rischio dovuto alla franosità dei versanti occupa una posizione di assoluta preminenza, è indispensabile innanzitutto definire con grande precisione la morfologia superficiale dei fronti.

La perfetta ricostruzione topografica del sito è indispensabile per il corretto svolgimento di qualunque analisi approfondita, sia dal punto di vista geotecnico sia dal punto di vista idraulico, col quale termine si identificano più specificatamente lo studio della circolazione delle acque sub-superficiali e l'analisi del comportamento delle acque di ruscellamento libero, con l'identificazione delle direttrici principali di flusso, degli assi di corrivazione e delle zone di ristagno dalle quali si possono verificare fenomeni di infiltrazione persistenti in modo anomalo.

In termini generali, come si illustrerà nel prosieguo del capitolo, è possibile utilizzare approcci differenti, anche in funzione del livello progettuale e di conseguenza della disponibilità economica relativa alle indagini preliminari.

Nei seguenti sotto-capitoli analizzeremo le tre grandi famiglie in cui è possibile suddividere le metodologie di raccolta delle informazioni topografiche:

- dati di letteratura;

- strumentazione terrestre;

- fotogrammetria aerea.

Ci si soffermerà in particolare sulla terza classe, che oltre ad essere stata considerata più idonea ad essere applicata allo specifico caso, nelle fasi progettuali più avanzate, appare anche assai più interessante dal punto di vista scientifico, costituendo un approccio innovativo divenuto fruibile solo grazie all'incremento esponenziale della capacità di calcolo degli elaboratori elettronici.

4.1 Dati di letteratura

Molti Enti, tradizionalmente, rendono disponibili al pubblico elaborati cartografici, un tempo in forma esclusivamente cartacea come le vecchie tavole dell'IGM, con un esempio riportato di fianco.

Con l'evoluzione tecnologica digitale e soprattutto con la possibilità di accedere a vastissime banche dati tramite Internet, il ventaglio delle possibili fonti di acquisizione di informazioni topografiche si è ampliato enormemente.

Ad oggi sono pubblicate in formate digitale carte topografiche in scala 1:10'000 rielaborate dalle vecchie mappe IGM e aggiornate sullo stato attuale aa fronte di nuove modifiche del territorio.

Le grandi imprese in campo informatico, quali Google, Microsoft, Apple, hanno da tempo reso disponibili supporti cartografici costituiti dalla mosaicatura di foto satellitari e di foto aeree, con la possibilità in alcuni casi di fornire immagini in tempi diversi. Questo strumento può essere vantaggioso quando è stato modificato l'assetto del territorio in modo da confrontare l'assetto originale del territorio da quello finale).

Associata alla fotografia aerea questi software abbinano quotature altimetriche dalle quali su cui è possibile ottenere una ricostruzione delle curve di livello del terreno.

Tale ricostruzione si basa però su un modello digitale del terreno costituito da maglie di dimensione troppo grande rispetto alla tipica scala dei problemi legati ai versanti in frana, e pur potendo fornire informazioni qualitative sull'andamento topografico del terreno, ha una definizione insufficiente per un uso pratico.

4.1.1 I Modelli Digitali del Terreno (DTM) pubblici

Molti Enti rendono disponibili, in forme diverse, i Modelli Digitali del Terreno, con risoluzioni dichiarate ragionevolmente buone, ad esempio il *GeoPortale* della Regione Piemonte [2].



RIPRESA AEREA ICE 2009-2011 - DTM 5m in formato DXF3D

[Metadati](#) | [Metadati \(XML\)](#)

Identificazione

Titolo	RIPRESA AEREA ICE 2009-2011 - DTM 5m in formato DXF3D
Formato di presentazione	Immagine digitale
Identificatore unico di risorsa	r_piemon:d489af35-fe80-44b1-b445-d438756e1171_resource
Id livello superiore	r_piemon:d489af35-fe80-44b1-b445-d438756e1171_resource
Altri dettagli	
Descrizione	DTM a copertura regionale con risoluzione della griglia (passo) 5x5 m2, in formato DXF 3D, derivato per trasformazione dal DTM Lidar (Volo ICE 2009-2011) a maglia 5x5 m2.
Tipo di rappresentazione spaziale	Dati vettoriali
Lingua dei metadati	ita
Set dei caratteri dei metadati	utf8
Informazioni supplementari	
Categoria Tematica	Mappe di base - Immagini - Copertura terrestre
Data	Creazione: 2016-05-09

Qualità e validità

Livello di qualità	Dataset
Genealogia	<ul style="list-style-type: none"> - volo aereofotogrammetrico con rilievo LiDAR (Leica ALS) - quota di volo relativa 4500 m - ricoprimento long. tra il 55% e il 70% - processamento dei dati GPS/INS - filtraggio e classificazione dei dati LiDAR - editing manuale dei dati LiDAR classificati - ottenimento della nube di punti XYZ - trasformazione al sistema di riferimento ETRS89/UTM-zone32N - interpolazione su griglia regolare (5m) - trasformazione da formato geotiff a formato DXF 3D tramite librerie gdal/ogr con il comando: ogr2ogr -f "DXF" {outFile} {inFile} -zfield {ColumnWithZValue}
Accuratezza posizionale	2 (m)
Grado di conformità	conforme

Fig.4.1 – Caratteristiche dati DTM

Tramite tale sito, infatti, è possibile scaricare l'intera copertura regionale con quote associate ai nodi di una griglia con maglie di dimensione 5 x 5 m, ed una accuratezza posizionale dichiarata di 2 m, il che significa che la quota indicata è verificata sul terreno entro e non oltre una distanza dal nodo di due metri.

Tali dati sono utilizzabili in modo diretto utilizzando *software* in grado di trattarli rendendoli graficamente leggibili o numericamente fruibili per applicazioni di più alto livello, quali analisi di stabilità, verifiche idrauliche, rotolamento massi e quant'altro.

Diversi portali, tra cui quelli che fanno riferimento a Regione Piemonte e ad ARPA Piemonte, rendono inoltre disponibile *on-line* la visualizzazione dei dati, talora con la possibilità di effettuare "interrogazioni" dei singoli punti direttamente sullo schermo, o semplicemente applicando al di sopra della proiezione ortofotografica le curve di livello.

Nel contesto degli strumenti forniti dagli Enti si ritiene particolarmente valido l'applicativo Geo3D.

Tale strumento, infatti, consente di effettuare con semplicità diverse elaborazioni assai utili per l'esecuzione almeno di una prima serie di analisi sommarie.

L'applicazione utilizzata con maggior frequenza è certamente la ricostruzione delle curve di livello, o isoipse.

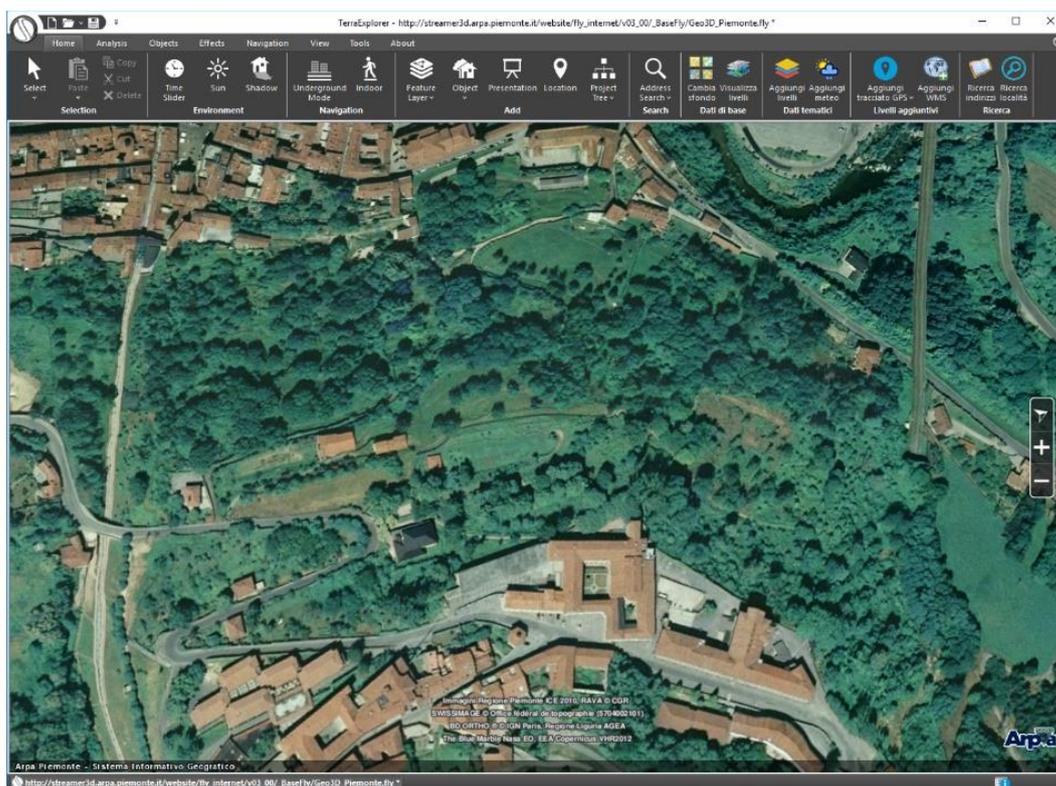


Fig.4.2 – Applicativo Geo 3D Arpa

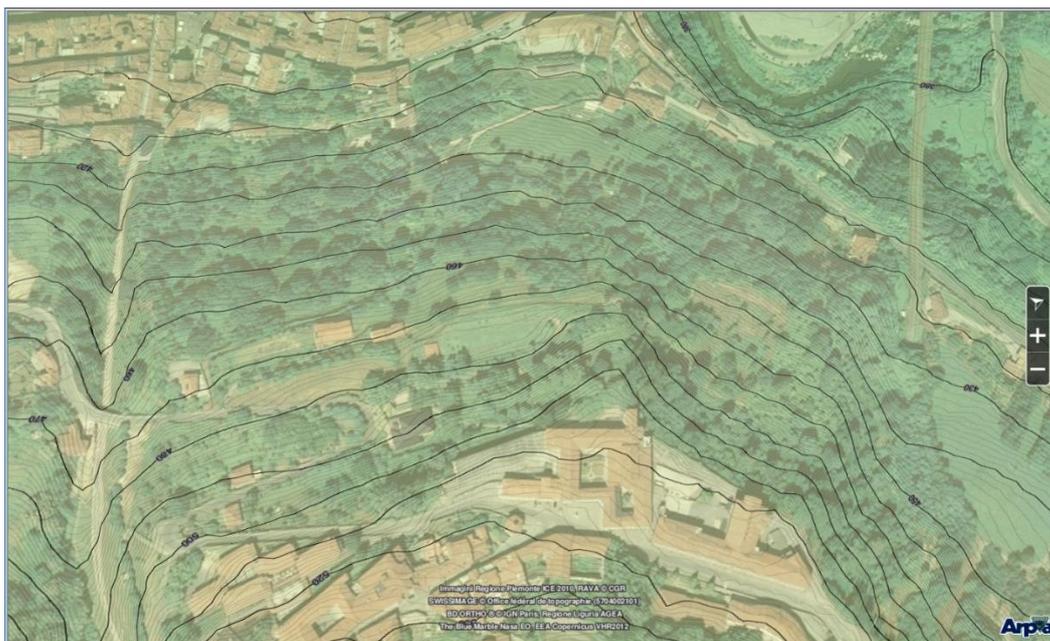


Fig.4.3 – Applicativo Geo 3D Arpa Curve di livello

Analisi più sofisticate, quali la creazione della mappa delle pendenze, denunciano però la modesta qualità delle interpolazioni effettuate nella ricostruzione della griglia (descritte nei metadati riportati in precedenza), come si può vedere nell'immagine sottostante che risulta pesantemente affetta da una distorsione geometrica dovuta alle traiettorie percorse in *strisciate* nella raccolta dei dati originali LiDAR.

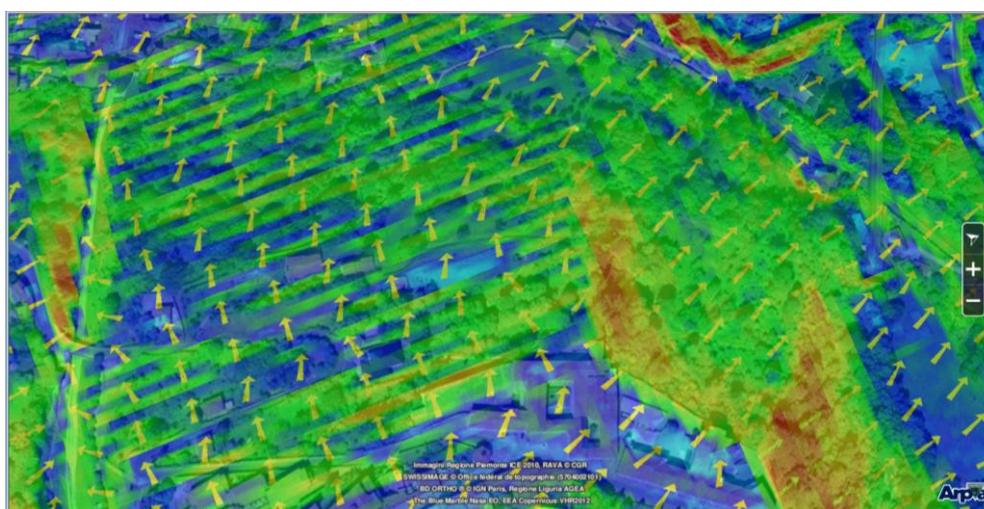


Fig.4.3 – Applicativo Geo 3D Arpa Curve di livello

Tali dati, quindi, sono quindi utilizzabili solo nelle fasi iniziali della progettazione, allorché i dettagli minuti della geometria di versante non rivestono ancora un ruolo cruciale nella definizione e nel dimensionamento degli interventi più adeguati alla mitigazione del rischio.

4.1.2 Dati Lidar

Il LiDAR, acronimo dall'inglese *Light Detection and Ranging*, è uno strumento concettualmente simile al *Radar*, e si differenzia da questo per il fatto di utilizzare un raggio laser di lunghezza d'onda variabile, a seconda delle applicazioni richieste, dall'ultravioletto al vicino infrarosso.

Il vantaggio principale è dato, oltre alla coerenza ed alla densità del fascio prodotto, dalla lunghezza d'onda significativamente più corta rispetto al segnale in banda radio utilizzato dal Radar, che consente una interazione importante con oggetti di ridotte dimensioni i quali, grazie al fenomeno della retrodiffusione, rinviano alla strumentazione radiazione luminosa sia alla stessa lunghezza d'onda del segnale originariamente emesso, sia su altre lunghezze d'onda.

La misura del tempo di ritorno dell'impulso Laser fornisce informazioni estremamente precise sulla distanza tra lo strumento ed il punto focalizzato; l'analisi spettroscopica del segnale luminoso di ritorno aiuta a caratterizzare il materiale che ha interagito con il fascio laser.

Unitamente a sistemi GPS ad alta precisione è possibile utilizzare apparecchiature LiDAR aviotrasportate, che sono infatti abitualmente utilizzate per la mappatura topografica di vaste aree.

Un ulteriore pregio di questa tecnologia consiste nell'elevata frequenza di emissione degli impulsi laser che consente, da un lato, una scansione del territorio estremamente dettagliata e, dall'altro lato, una molteplicità di impulsi che hanno la possibilità di essere retrodiffusi ora dalla sommità delle chiome della vegetazione arborea, ora dal terreno.

In tal modo in un intorno ridotto (si consideri che sono comunemente disponibili dati LiDAR con passo di scansione di un metro) si hanno più valori dal cui *range*, con elevata probabilità, è possibile determinare la geometria reale della superficie del terreno (elemento fondamentale per le analisi geotecniche e idrauliche) e l'altezza delle piante presenti nell'area.

Sul *Portale Cartografico Nazionale* del *Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare* sono riportate le aree (rettangoli gialli) mappate con strumentazione LiDAR aviotrasportata con passo medio tra i punti di 1 m.

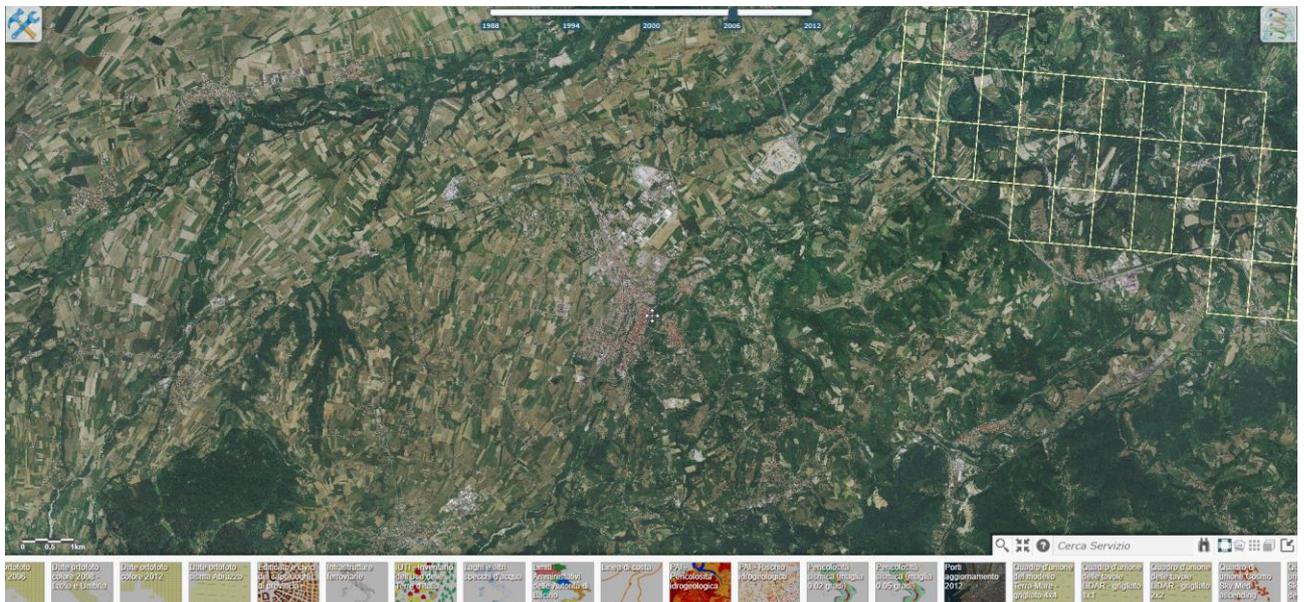


Fig.4.4 – Geoportale nazionale

La procedura per l'ottenimento dei dati LiDAR è piuttosto complessa, principalmente per la necessità di cautelarsi dall'uso illegale di dati di precisione tanto elevata [3].



Procedura per la Richiesta dei Dati Lidar e/o Interferometrici PS

Passo 1

Inviare una richiesta dati firmata all'indirizzo datipst@minambiente.it, intestata a:

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare
Direzione Generale per la Salvaguardia del Territorio e delle Acque
Geoportale Nazionale
Via Cristoforo Colombo, 44 - 00147 Roma

All'interno della richiesta vanno inserite le seguenti informazioni:

- Riferimenti del richiedente (Nome, Cognome, e-mail e telefono);
- Oggetto della richiesta: dati LIDAR e/o Interferometrici PS (specificare area o località interessata);
- Breve presentazione dell'attività per cui saranno utilizzati i dati, comprensiva della motivazione per cui vengono richiesti;
- Indicazione del tipo di prodotto LIDAR richiesto (DTM, DSM First, DSM Last, Intensity, Punti xyz) e/o Interferometrici PS;
- Descrizione dell'area di interesse allegando obbligatoriamente la perimetrazione in formato shapefile o l'elenco delle tavole o dei cluster estratti dai servizi WMS e WFS reperibili all'indirizzo:
<http://www.pcn.minambiente.it/mattm/servizio-di-scaricamento-wfs>

Passo 2

L'Amministrazione, entro i termini previsti dalla L. 241/90 e s.m.i., invia tramite e-mail le norme, i vincoli di utilizzo e l'importo dei costi di Amministrazione, ovvero dei diritti l'estrazione dati, ai sensi del Decreto del Ministro dell'Ambiente e Tutela del Territorio e del Mare n. 121 del 28/6/2012, i quali ammontano a € 2,00 per la ricerca di archivio.

Passo 3

Il richiedente invia le norme e i vincoli di utilizzo visionati e firmati, allegando la ricevuta del bollettino di pagamento dei costi di Amministrazione.

Passo 4

Accertato l'avvenuto pagamento, l'Amministrazione provvede a fornire via posta elettronica le credenziali per accedere allo spazio FTP, al fine di procedere al download dei dati, che potrà essere effettuato entro 10 gg dall'invio della e-mail.

Fig.4.5 – Procedura richiesta dati Lidar

Sfortunatamente i rilievi LiDAR, ad oggi, sono stati completati e resi disponibili in forma organizzata esclusivamente nel contesto della protezione delle aree fluvio-lacustri e costiere, come si evince dall'immagine seguente, per cui spesso chi si occupa del controllo dei movimenti franosi si ritrova nella sgradevole situazione di trovarsi collocato non molto distante ma fuori dai limiti delle aree rilevate, come per l'appunto nell'immagine riportata nella pagina precedente, in cui il sito oggetto del presente studio è indicato dalla posizione del cursore.



Fig.4.6 – Copertura dati Lidar

4.1.3 Modelli digitali Differenze DEM, DTM e DSM

Le superfici utilizzate per la modellazione del terreno sono superfici statistiche che è una rappresentazione della distribuzione dei valori di un determinato fenomeno definito, per ogni coppia di coordinate (X, Y), da un valore di Z, misurato o calcolato. Questi punti sono frutto di un processo di interpolazione ed estrapolazione.

Si elencando le diverse tipologie di superfici [4]:

- DEM: Digital Elevation Model (Modello Digitale di Elevazione).
- DTM: Digital Terrain Model (Modello Digitale del Terreno)
- DSM: Digital Surface Model (Modello Digitale della Superficie – o delle superfici);

Il DEM è un modello di elevazione generale che comprende al suo interno il DTM e il DSM.

Il DSM è il modello che descrive l'andamento della superficie terrestre con gli oggetti che sono posti al di sopra del terreno (sono rilevati gli alberi e gli edifici).

Il DTM è il modello della superficie terrestre filtrata dagli elementi antropici o vegetazionali (non sono rilevati gli alberi e gli edifici)

L'immagine sottostante illustra la differenza tra le due interpretazioni dei dati altimetrici.

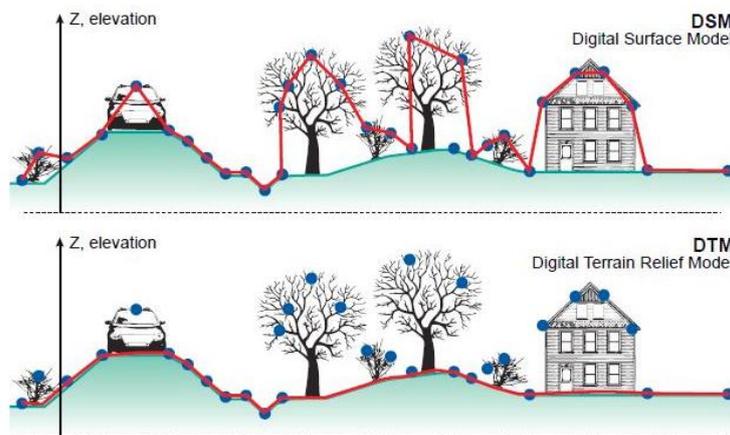


Fig.4.7 – Differenza DSM-DTM

Il DTM per lo studio del suolo risulta chiaramente il più efficace ma necessita di un'elaborazione più onerosa in quanto si devono riconoscere gli oggetti al di sopra del terreno per "eliminarli" e ricostruire il terreno da punti vicini.

4.2 Strumentazione terrestre

L'approccio più tradizionale al rilievo topografico è basato sull'uso di strumenti ottici in grado di collegare spazio, tempo e riferimenti immutabili.

4.2.1 Stazione totale

Così, dai pozzi e dagli obelischi di Eratostene, passando per i sofisticati sestanti settecenteschi e per i ben più moderni teodoliti, si è giunti alle moderne strumentazioni topografiche, come le stazioni totali che, utilizzando un principio simile a quello del LiDAR per la misurazione delle distanze unitamente a goniometri elettronici di precisione per la determinazione degli angoli zenitali e azimutali, sono in grado di definire la posizione dei punti di misura con precisioni millimetriche o sub-millimetriche con l'uso di prismi retroriflettenti di alta precisione.

Questi strumenti permettono con facilità di definire poligoni di altissima precisione in termini di posizione relativa, quantunque siano soggetti alle stesse limitazioni che caratterizzano le attrezzature topografiche più tradizionali nel collocare tali poligoni in riferimenti spaziali assoluti.

Come si vedrà la stazione totale è di grande aiuto per correggere le distorsioni che possono verificarsi utilizzando i moderni procedimenti di automazione del trattamento delle immagini aerofotogrammetriche, e infatti vengono largamente utilizzate per costruire una rete di punti di riferimento affidabile che costituisca un vincolo geometrico per il corretto posizionamento dei punti interpolati con tali procedure.

4.2.2 Sistemi GPS

I sistemi GPS, quando utilizzati in accoppiamento a stazioni di misura fisse di proprietà o appoggiandosi a servizi come il portale interregionale *SPIN GNSS* per la correzione in tempo reale o in post processing, consentono di collocare i rilievi da terra o aerei con una precisione assoluta dell'ordine di pochi centimetri.

Non essendo stati utilizzati nello specifico caso in esame, se ne accenna qui solo per completezza.

The screenshot shows the SPIN GNSS web portal. The header includes the SPIN GNSS logo and the text 'Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS Piemonte - Lombardia'. On the right, there are logos for 'REGIONE PIEMONTE' and 'Regione Lombardia'. The main content area is titled 'Servizi offerti dalla rete SPIN GNSS' and 'Servizi in tempo reale (RTK di rete)'. It lists connection parameters: IP: 158.102.161.199, Port: 2101, and Username/Password. Below this is a table of services and mountpoints.

Servizio	Mountpoint	Costellazioni	Formato di trasmissione
MAC RTCM 3.x	RTK_MAC/MAX_RTCM3	GPS+GLO	RTCM 3
VRS Galileo	GAL_VRS_MSM5	GPS+GLO+GAL	RTCM 3 (MSM5)
VRS RTCM 3.x	RTK_VRS_RTCM3	GPS+GLO	RTCM 3
VRS RTCM 2.3	RTK_VRS_RTCM2	GPS+GLO	RTCM 2.3
VRS CMR	RTK_VRS_CMR	GPS+GLO	CMR
VRS CMR+	RTK_VRS_CMR+	GPS+GLO	CMR+
IMAX Galileo	GAL_IMAX_MSM5	GPS+GLO+GAL	RTCM 3 (MSM5)
IMAX RTCM 3.x	RTK_IMAX_RTCM3	GPS+GLO	RTCM 3
FKP RTCM 2.3	RTK_FKP_RTCM2	GPS+GLO	RTCM 2.3
NRT Galileo	GAL_NRT_MSM5	GPS+GLO+GAL	RTCM 3 (MSM5)
NRT RTCM 3.x	RTK_NRT_RTCM3	GPS+GLO	RTCM 3

Fig.4.8 – Sistemi GPS

4.3 Rilievo aerofotogrammetrico

Una notevole importanza nell'esecuzione dei rilievi topografici del sito oggetto del presente documento è rivestita dai rilievi aerofotogrammetrici eseguiti a mezzo drone.

Il quadricottero utilizzato per la ricostruzione della superficie topografica è un DJI Phantom 4 Pro, un modello che monta una fotocamera di alta qualità, con un sensore da 1" da 20 MPixel che, grazie all'elevata sensibilità, garantisce condizioni di ripresa ottimale anche in condizioni di illuminazione non ottimali, rappresentato nell'immagine sottostante.



Fig.4.9 – Phantom 4



Fig.4.10 – Volo su Mondovì

La foto è stata scattata da terra proprio durante il rilievo fotogrammetrico a Mondovì, tant'è vero che l'edificio che compare sulla destra è proprio l'ala sud dell'Istituto Alberghiero presente a monte del versante, ed il passaggio di un mezzo aereo, per la verità piuttosto inconsueto, ha costretto all'immediata interruzione del volo, nel rispetto delle norme Enac, per evitare, per quanto remoto, ogni possibile rischio di collisione.

Sono stati effettuati diversi voli con la registrazione di numerose fotografie, in stagioni diverse e con finalità differenti, sia per seguire lo sviluppo degli interventi urgenti di messa in sicurezza della piccola frana sviluppatasi a sud dell'edificio scolastico, sia per ottenere, nella stagione che come si vedrà è ottimale per questo tipo di rilievi, una visione ampia e completa dell'intero versante potenzialmente instabile.

Per la creazione del modello tridimensionale sono stati utilizzati di ampi *set* di foto aeree, si parla di diverse centinaia di immagini ad alta risoluzione.

In estrema sintesi l'elaborazione si articola in quattro fasi successive, ognuna caratterizzata da una specifica esigenza teorica, e a ciascuna delle quali possono essere associati algoritmi informatizzabili o semplicemente procedure eseguibili anche manualmente:

- identificazione, all'interno delle varie fotografie, di punti ripresi da molteplici diverse posizioni della fotocamera;
- calcolo della posizione di ciascuno dei punti rispetto ad un sistema di riferimento arbitrario;
- collegamento dei punti fino a formare un reticolo di maglie triangolari che ricopre completamente l'area rilevata;
- applicazione ad ogni maglia triangolare della porzione di un fotogramma che gli corrisponde.

4.3.1 Creazione della nuvola di punti

Il primo processo eseguito dal software è quello di identificare, all'interno delle varie fotografie scattate durante il volo, i punti ripresi da molteplici diverse posizioni della fotocamera. Si ottiene una nuvola di punti hanno delle forti caratteristiche di riconoscibilità indipendentemente dall'orientamento e dalla distanza del punto di vista tramite un algoritmo denominato SIFT [Appendice-11]

4.3.2 Creazione della nuvola di punti densa

Una volta nota con buona precisione la posizione e la direzione di puntamento delle fotocamere diventa assai facile infittire la nuvola di punti identificare sulla base dei rapporti geometrici e cromatici dei punti che vengono visti da 3 o più posizioni col che è possibile calcolarne con una precisione tanto maggiore quanto più grande è il numero di immagini in punto compare, le coordinate relative all'origine predeterminata ottenendo così una nuvola contenente un numero di punti estremamente maggiore rispetto a quanto ottenuto tramite SIFT denominata nuvola densa.

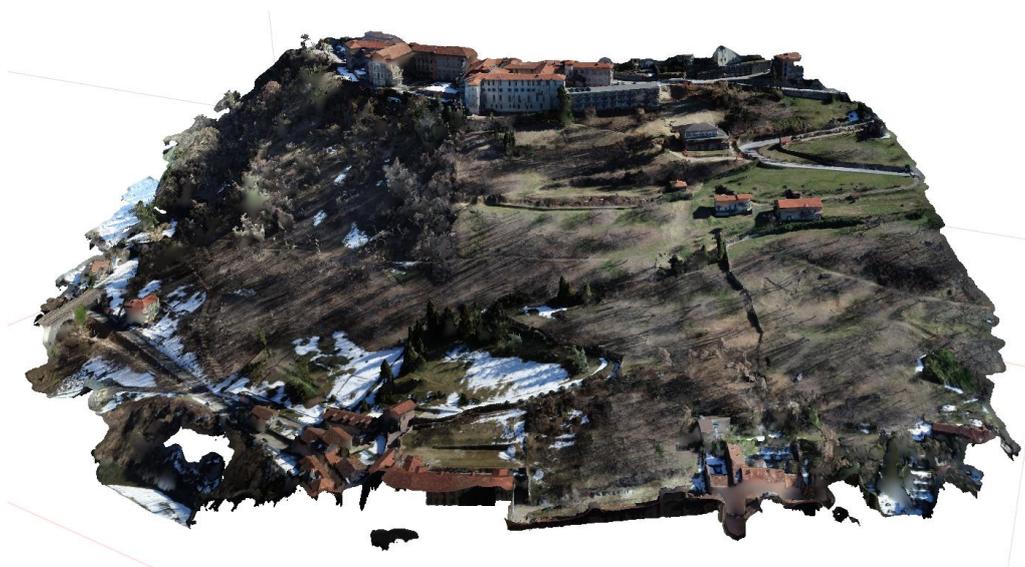


Fig.4.11 – Ricostruzione versante

In tal modo è possibile ottenere una nuvola di punti molto più fitta, come nella figura (4.11) che rappresenta l'infittimento della nuvola di punti-chiave precedentemente riportata, che ha una densità tale che, a questa scala, appare come una superficie continua.

Solo ingrandendo si arriva a percepire che, in realtà, l'immagine è formata da punti discreti.



Fig.4.12 – Ricostruzione nuvola densa

4.3.3 Costruzione della mesh triangolare

Come visto nel capitolo precedente la nuvola densa, pur offrendo la descrizione in assoluto più dettagliata della superficie del terreno, dal punto di vista puramente grafico risulta piuttosto scadente, a causa della mancanza di continuità tra i singoli punti.

Ecco allora che si procede ad un successivo trattamento con la costruzione di una maglia triangolare su cui verrà poi “spalmato” un frammento di immagine fotografica, per consentire una vista più naturale e per certi versi più dettagliata del sito.

Questa procedura è particolarmente utile per la creazione di modelli tridimensionali navigabili e per la creazione di elaborati ortofografici sia nadirali che frontali.

La tecnica più frequentemente usata è quella della cosiddetta “Triangolazione di Delaunay”.

La triangolazione viene detta di Delaunay se il cerchio circoscritto ad ogni triangolo è vuoto, ovvero nessun altro punto vi giace all'interno.

Soprattutto ogni triangolazione di Delaunay massimizza il più piccolo angolo interno tra tutte le triangolazioni possibili, riducendo sgradevoli effetti dovuti alla presenza di triangoli lunghi e sottili all'interno della maglia, che trasportano *informazione* altimetrica errata in aree non pertinenti.

Tale triangolazione, inoltre, consente la modellazione tridimensionale di oggetti concavi, vantaggio estremamente positivo al fine della ricostruzione di modelli complessi di edifici o aree alberate.

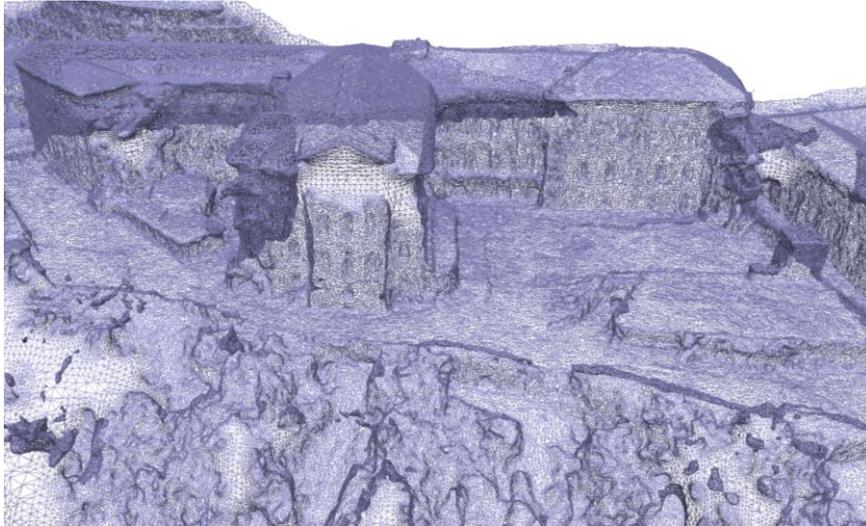


Fig.4.12 – Ricostruzione mesh

4.3.4 Applicazione della texture

L'ultimo passo consiste nell'applicazione della tessitura, o più comunemente *texture*, alle maglie ricostruite con la triangolazione di Dalaunay.

Il principio è di per sé semplice: si tratta di trovare il punto di ripresa dal quale una particolare maglia viene vista “meglio”, identificare sulla fotografia i punti corrispondenti ai tre vertici del triangolo, ritagliare la porzione triangolare dell'immagine e stirarla attraverso una *trasformazione affine* per farle assumere la stessa forma della maglia proiettata sullo schermo dal punto di vista scelto.

Il concetto di “miglior” vista non è univocamente definito, potrebbe essere scelto in funzione dell'ortogonalità tra la maglia e la direzione di ripresa, ovvero della distanza tra la fotocamera e la maglia: in senso generale si considera migliore il fotogramma in cui la proiezione della maglia triangolare è coperta dal massimo numero di pixel.

In realtà i triangoli estratti dalle fotografie subiscono una prima deformazione per compensare la differenza angolare tra *la direzione di puntamento della fotocamera* e la normale al piano che contiene la maglia, quindi, tipicamente con un procedimento in tempo reale, il triangolo viene nuovamente distorto per compensare la differenza angolare tra *la direzione dello sguardo dell'osservatore* dal punto di vista scelto e la normale al piano che contiene la maglia.

Questo doppio passaggio permette di armonizzare le porzioni contigue tratte da fotogrammi diversi, che potrebbero differire per le caratteristiche dell'esposizione, ovvero durata dello scatto ed apertura del diaframma.

La stessa porzione dell'oggetto fotografato risulta in genere più o meno luminosa a seconda dello scatto, soprattutto quando viene utilizzata, come di solito avviene, la modalità di esposizione automatica, nel qual caso con un procedimento chiamato *blending*, miscelazione, i valori di luminosità, contrasto e saturazione vengono sfumati in modo da non rendere evidente la linea di separazione tra maglie contigue.

Le immagini che seguono riassumono le diverse fasi del procedimento completo, in una piccola porzione che contiene parte della frana che aveva coinvolto la sede stradale immediatamente a sud dell'edificio scolastico dell'Alberghiero di Mondovì, dopo i primi interventi di messa in sicurezza.

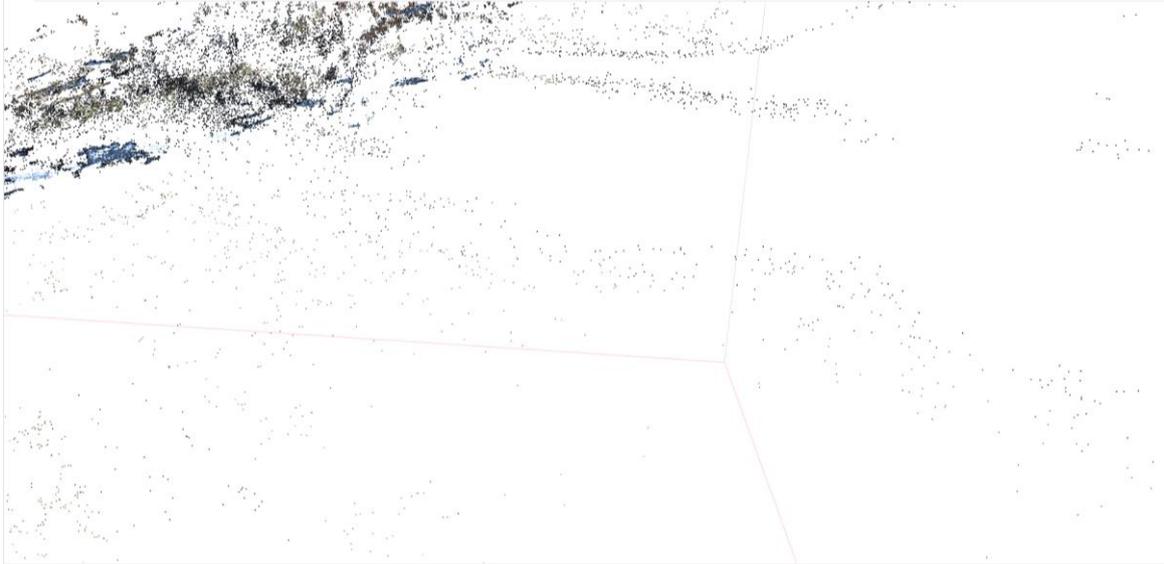


Fig.4.13-Nuvola di punti-chiave ottenuta tramite l' algoritmo SIFT



Fig.4.14 - Nuvola densa ottenuta dall'infittimento eseguito tramite pattern-recognition

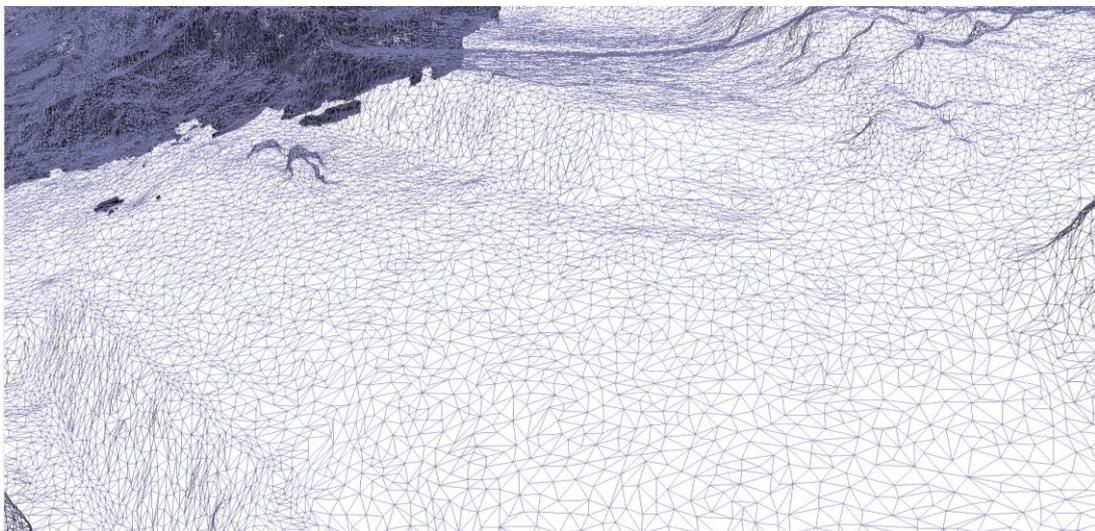


Fig.4.15 - Mesh a maglie triangolari ottenuta con triangolazione di Delaunay



Fig.4.16 - Mesh con maglie colorate tramite pseudo-illuminazione



Fig.4.17 - Mesh colorata tramite sfumatura dei colori dei vertici



Fig.4.18 - Mesh colorata tramite l'applicazione delle texture

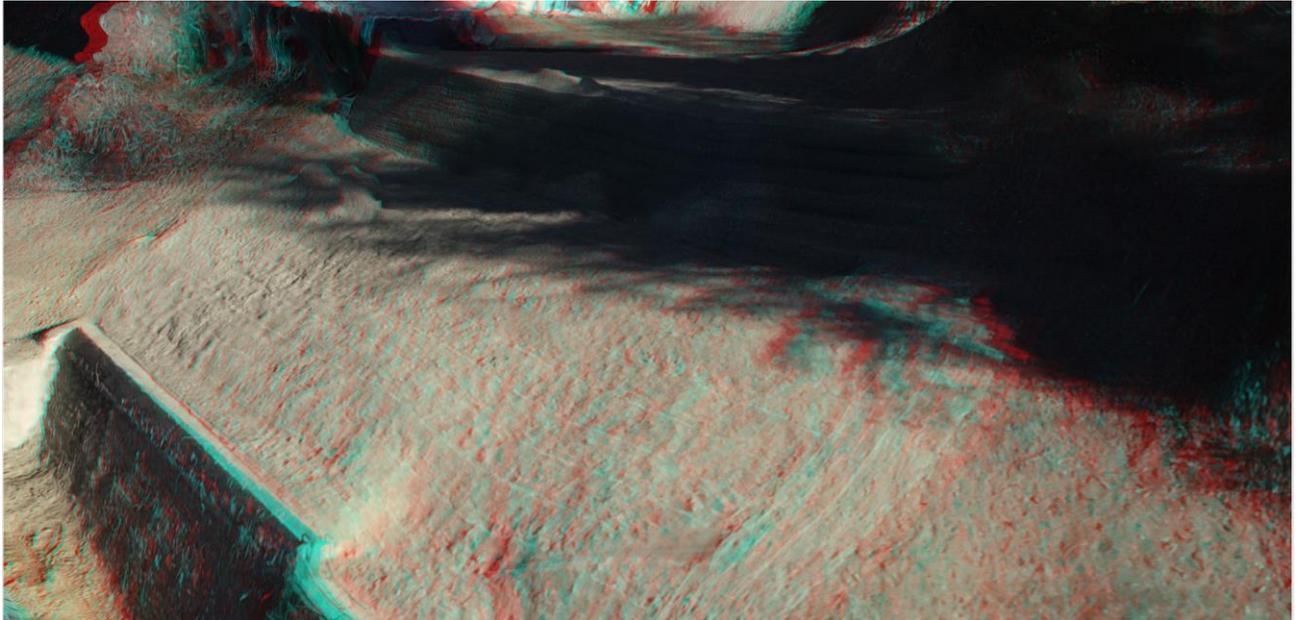


Fig.4. 19 - Mesh colorata tramite l'applicazione delle texture in formato stereoscopica

L'immagine precedente è una ricostruzione particolare, detta *anaglifica*, in cui vengono elaborate due prospettive da punti di vista posti ad una distanza equivalente a quella intraoculare, filtrate per colori complementari, e quindi ricomposte in un'unica immagine che, guardata attraverso occhiali con filtri di colore rosso e ciano, appare tridimensionale, opzione estremamente utile in fase progettuale per una corretta interpretazione della morfologia del terreno.

L'immagine seguente mostra come, durante il periodo di riposo vegetativo, nelle riprese da quote dell'ordine 70 m rami e tronchi non vengano risolti, ottenendo una eccellente ricostruzione della superficie del terreno, in cui dell'alberatura a foglia caduca non rimane che l'ombra!



Fig.4. 20 - Mesh colorata tramite l'applicazione delle texture in formato stereoscopica

Alla base la Formazione di Lequio, di età Serravalliano - Tortoniano, prevalentemente costituita da alternanze di marne a grosse bancate, alternate ad arenarie e sabbie in strati di spessore centimetrico-decimetrico.

Lungo il Torrente Ermena è osservabile una sequenza nella quale alle sequenze marnoso-arenacee sono intercalati diversi livelli conglomeratici a matrice sabbiosa, di spessore metrico.

L'ambiente deposizionale è neritico, con modesti apporti torbiditici, più frequenti nella parte basale della formazione; lo spessore della formazione nell'areale monregalese si aggira sui 600 m.

Segue la Formazione delle Marne di S. Agata Fossili, età Tortoniano, costituita da marne, talora sabbiose o siltose, in sequenze relativamente omogenee, di colore grigio, talora giallastro per alterazione, con rare intercalazioni di sabbie giallastre.

Un ambiente di deposizione di mare aperto e poco profondo è ipotizzato da Casnedi, con spessore della serie calcolato in 350 m (Casnedi, 1971).

I settori di pianura sono invece interessati dalla diffusa presenza di depositi alluvionali legati all'azione erosiva e de posizionate dei numerosi corsi d'acqua che, provenienti dalle Alpi Marittime, sfociano in pianura generando conoidi alluvionali.

Nell'area in oggetto affiorano Argille grigio azzurre e sabbie (di età Pliocene).

Il tratto di versante coinvolto dalla frana è caratterizzato dalla presenza della litologia sabbiosa ricoperta da abbondante materiale di riporto, probabilmente messo in posto in tempi anche molto antichi.

Per quanto riguarda l'assetto geomorfologico, gran parte del territorio comunale appartiene alla pianura pedemontana cuneese.

La pianura, che appare terrazzata, è profondamente incisa dai torrenti Pesio, Ellero, e dai principali loro affluenti (Branzola, Brobbio, Pogliola), che hanno scavato valli profonde fino ad oltre 80 m, scorrendo in direzione grosso modo NE- ENE; verso sud la pianura fa posto a rilievi collinari di moderata acclività.

Il paesaggio morfologico trova una sostanziale giustificazione nell'evoluzione, in particolare quaternaria, della regione.

I rilievi collinari più acclivi, con pendenze comprese tra i 10° e i 20°, situati a Sud ed a Est di Mondovì, sono costituiti dai terreni Miocenici del Bacino Terziario Piemontese.

I processi di modellamento dei versanti attivi nell'area monregalese sono sostanzialmente legati all'azione della gravità.

Al di sopra dei terreni miocenici, che formano l'ossatura di gran parte dei rilievi collinari, lo sviluppo delle coltri eluvio-colluviali è limitato, il substrato affiora spesso al di sotto di pochi decimetri di suolo.

Depositi eluvio-colluviali sono più comuni sui versanti delle valli incise dai torrenti principali Ellero, Pesio e Branzola, caratterizzati da pendenze più elevate.

I movimenti gravitativi sono invece molto frequenti ed estesi nella collina di S. Lorenzo e nei versanti nord-occidentali dei rilievi che vanno da Mondovì a Pasco dei Monti.

I fenomeni di instabilità riguardano in gran parte la formazione Miocenica marnoso-arenacea di Lequio.

L'esistenza di frane di grandi dimensioni (dell'ordine di grandezza del km), di età probabilmente antica (paleofrane), tutte caratterizzate da più o meno estesi fenomeni di riattivazione parziale,

attuali o comunque recenti, e di movimenti gravitativi e non, anch'essi con frequenti indizi di riattivazione, costituisce la testimonianza di una dinamica evolutiva dei versanti in atto, lontana da condizioni di equilibrio.

In particolare, il versante settentrionale di Mondovì Piazza è storicamente noto per diffusi e ripetuti fenomeni di instabilità.

Almeno dal 1951 sono state segnalate diverse frane; la morfologia del versante è marcatamente ondulata nella parte inferiore; mostra invece una forte inclinazione nella parte superiore, che è interessata da nicchie di distacco attive di frane di dimensioni decametriche, che si staccano da un substrato di marne argillose e sabbie.

Venute d'acqua sono frequenti ed abbondanti, in gran parte drenate da canalizzazioni di fattura artigianale. Esse sono legate probabilmente al limite di permeabilità rappresentato dalle marne argillose plioceniche poste a letto dei depositi più permeabili, prevalentemente sabbioso-limosi, plio-pleistocenici, in facies "Astiana" della sommità di Mondovì Piazza.

Il settore di versante collinare a NO del nucleo di Mondovì Piazza, compreso tra la quota 500 metri circa e il Fiume Ellero, risulta compreso nell'elenco dei "Centri abitati instabili" in base al D.M. del 28 luglio 1952.

5.1.2 Documentazioni della casistica storica dei dissesti

I fenomeni che hanno portato alla classificazione nell'elenco dei Centri abitati instabili e gli indizi geomorfologici riconoscibili attualmente possono essere così sintetizzati:

- 1) Due o tre fenomeni di scorrimento della coltre superficiale, avvenuti nel 1951 sul pendio immediatamente a Nord e ad Ovest dell'Ospedale, tra le quote 500 e 400 m circa;
- 2) un fenomeno di scorrimento superficiale, avvenuto negli anni 1970-73 nel settore compreso tra la Via Cottolengo e la sponda sinistra dell'Ellero;
- 3) l'attività erosiva in sponda sinistra dell'Ellero, incidente sia sulla coltre di copertura che sulle marne di substrato;
- 4) alcuni indizi fotogeologici ricollegabili all'effetto di possibili fenomeni gravitativi sul settore di versante compreso tra l'Ospedale, il margine dell'abitato di Carassone e la linea FFSS;
- 5) alcuni danni riguardanti i terreni coltivati;
- 6) le opere di consolidamento realizzate nel 1973 e 1989-90 (palificazioni lungo la Via Cottolengo e muro d'argine sul corso d'acqua).

5.1.3 Descrizione geomorfologica di dettaglio del sito

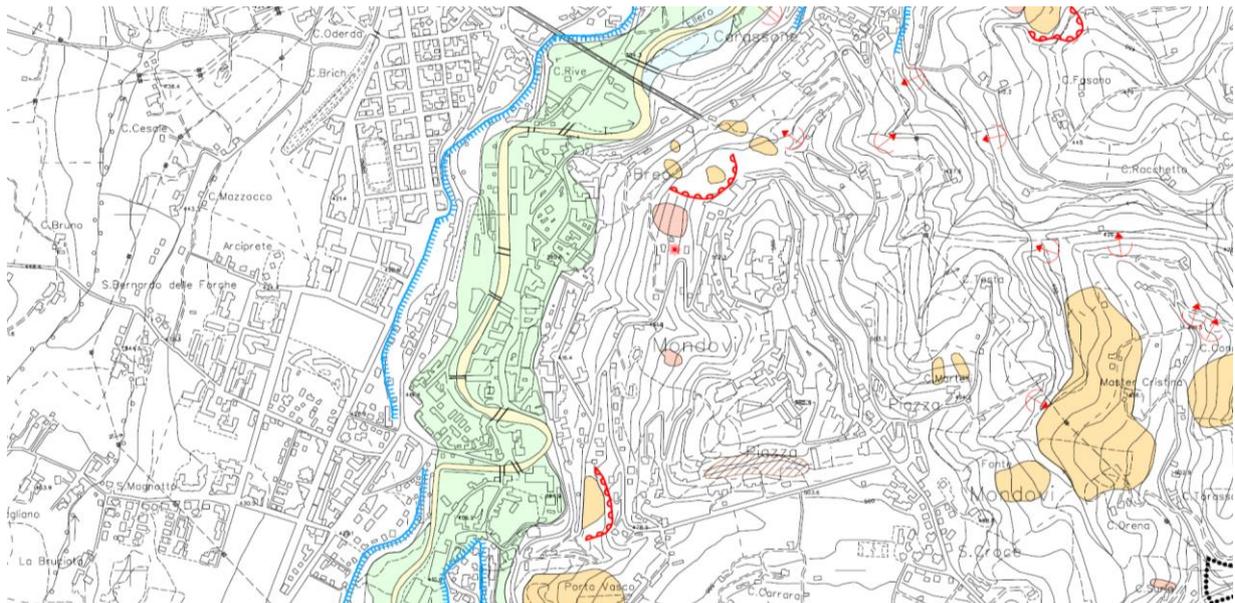


Fig.5.2 – Carta geomorfologica da geoportale Arpa

LEGENDA

Depositi superficiali

-  Discariche e materiali di riporto
-  Coltri eluvio-colluviali
- Accumuli di frana
 -  attiva
 -  inattiva
- Depositi alluvionali degli alvei attuali
 -  alvei attuali a piano riva
 -  piano di esondazione attuale non terrazzata
 -  piano di esondazione terrazzata di quota inferiore alla pianura principale

Forme di degradazione dei versanti

-  Soliflusso
- Nicchia di distacco
 -  attiva
 -  inattiva
-  Piccoli fenomeni franosi
-  Orlo di scarpata di degradazione
-  Soil slip / debris flow
-  Trinchea di frana
-  Lesioni negli edifici e infrastrutture legate a movimenti gravitativi

 Limite del Comune

Forme fluviali e torrentizie

-  Orlo di scarpata di terrazzo fluviale
-  Scarpa di erosione fluviale
-  Erosione di sponda
-  Imbocco di canali di esondazione
-  Ruscellamento diffuso

Il Settore Tutela Ambientale – Geologia e Territorio del Comune di Mondovì rende disponibile una vasta messe di documentazione tecnica di elevata qualità, tra cui gli elaborati cartografici relativi alla geologia ed alla geomorfologia del sito, tuttavia il livello di dettaglio, necessariamente, non arriva a coprire i più minuti particolari dei singoli siti.

Nonostante ciò si evince la presenza, palesata anche in questa documentazione a media scala, di nicchie di distacco attive e di accumuli di frana attivi, oltre a *lesioni negli edifici e infrastrutture legate a movimenti gravitativi* che fanno riferimento principalmente alle lesioni presenti da tempo nelle strutture murarie di contenimento a valle della Palestra Metavia e, ovviamente, al recentissimo fenomeno gravitativo che ha interessato il vano scale che era stato accostato all'estremità meridionale della Manica Sud dell'edificio scolastico.

5.2 Sondaggi presenti nel database Arpa Regione Piemonte

In questo capitolo sono raccolte le indagini geognostiche presenti nel database di Arpa Piemonte.



Fig.5.3 - Locazione sondaggi ricavati da Geoportale Arpa

Sondaggio A	Profondità (m)	Descrizione
	0.00 - 0.15	conglomerato
	0.15 - 0.50	terreno di riporto sabbioso ghiaioso fine
	0.50 - 1.00	terreno di riporto sabbioso limoso, poco consistente, con ghiaia fine e frammenti piccoli di laterizi
	1.00 - 1.15	ciottolo
	1.15 - 4.10	terreno di riporto limoso sabbioso, poco consistente, con abbondanti frammenti laterizi, sporadica ghiaia
	4.10 - 5.20	cemento e pietre cementizie
	5.20 - 8.80	alternanza di sabbia limosa e argilla limosa marnosa
	8.80 - 10.00	sabbia medio fine, a tratti debolmente limosa, da addensata a debolmente cementata; presenza di orizzonti arenacei
	10.00 - 15.50	sabbia medio fine, a tratti debolmente limosa, da addensata a debolmente cementata; presenza di orizzonti arenacei
15.50 - 20.00	alternanza di orizzonti di sabbia, sabbia limosa, limo e limo argilloso; presenza di sottili orizzonti di arenaria	

Sondaggio B	Profondità (m)	Descrizione
	0.00 - 0.30	conglomerato con sottofondo sabbioso ghiaioso
	0.30 - 0.50	ciottoli con riporto
	0.50 - 1.10	terreno di riporto limoso sabbioso argilloso con frammenti di laterizi e sparsa ghiaia fine
	1.10 - 1.60	terreno parzialmente rimaneggiato limoso sabbioso ghiaioso
	1.60 - 3.30	limo, limo sabbioso e limo debolmente argilloso, debolmente stratificato
	3.30 - 5.50	sabbia, moderatamente addensata, con passate sabbioso limose
	5.50 - 6.00	sabbia fine limosa
	6.00 - 7.90	sabbia mediamente addensata
	7.90 - 10.00	sabbia, addensata con assate debolmente cementate
	10.00 - 11.60	sabbia, mediamente addensata
11.60 - 15.00	alternanze di limo, limo sabbioso, limo argilloso e sabbia, debolmente stratificata; presenza di livelli di arenaria	

Sondaggio C	<i>Profondità (m)</i>	<i>Descrizione</i>
	0.00 - 0.40	terreno di riporto ghiaioso sabbioso con frammenti laterizi
	0.40 - 4.60	terreno di riporto limoso argilloso sabbioso, plastico e inconsistente, con frammenti sparsi laterizi, ghiaia e residui carboniosi
	4.60 - 5.00	sabbia, sabbia limosa e limo sabbioso, parzialmente rimaneggiato
	5.00 - 10.20	sabbia addensata con sottili intercalazioni sabbioso limose
	10.20 - 12.20	limo e limo sabbioso, debolmente stratificato, con passate sabbiose ossidate
	12.20 - 13.00	sabbia passante a sabbia fine limosa
	13.00 - 15.00	sabbia fine e sabbia limosa, addensata, debolmente stratificata, con sottili passate di sabbia fine, debolmente ossidata; presenza di orizzonte di arenaria debolmente cementata

Sondaggio D	<i>Profondità (m)</i>	<i>Descrizione</i>
	0.00 - 0.30	terreno vegetale costituito da sabbia debolmente limosa con ghiaia sparsa
	0.30 - 2.70	limo sabbioso a tratti debolmente argilloso con livelli intercalati ghiaioso fini, discreto grado di ossidazione, poco consistente
	2.70 - 6.00	sabbia prevalentemente medio fine limosa con rari livelli limoso argillosi intensa laminazione ossidata, poco addensata
	6.00 - 9.00	alternanza di livelli sabbioso fini e livelli limoso argillosi, intenso grado di ossidazione, poco addensata
	9.00 - 14.40	siltite sabbiosa con livelli intercalati di sabbia fine da poco consistente a consistente
	14.40 - 15.00	conglomerato litoide in matrice fine arenacea
	15.00 - 20.30	siltite marnosa a livelli sabbiosa con intercalazioni di livelli di conglomerato parzialmente decementato in matrice siltoso marnosa da molto consistente a sub-litoide
	20.30 - 22.00	conglomerato parzialmente decementato in matrice sabbiosa debolmente siltosa a tratti prevalente, sub-litoide
22.00 - 25.00	siltite marnosa a tratti sabbiosa con subordinati livelli di conglomerato in matrice sabbioso siltosa, sub-litoide	

Sondaggio E	<i>Profondità (m)</i>	<i>Descrizione</i>
	0.00 - 1.50	terreno vegetale costituito da sabbia limosa con ghiaietto sparso e radici
	1.50 - 1.80	sabbia eterometrica limosa con raro ghiaietto sparso, discreto grado di ossidazione, poco addensata
	1.80 - 2.00	ghiaia medio fine con sabbia eterometrica limosa, intenso grado di ossidazione, poco addensata
	2.00 - 3.60	sabbia prevalentemente medio grossolana limosa, raro ghiaietto sparso, grado ossidazione discreto, poco addensata con intercalati livelli siltoso sabbiosi
	3.60 - 7.80	siltite sabbioso fine con intercalate laminazioni sabbiose, consistente
	7.80 - 8.50	conglomerato eterometrico, ciottoli, parzialmente decementato molto addensato
	8.50 - 11.00	siltite debolmente marnosa, da molto consistente a sub-litoide
	11.00 - 20.00	siltite marnosa passante a marna siltosa con subordinate laminazioni sabbioso fini, da sub-litoide a litoide
	20.00 - 23.00	marna siltosa, a tratti debolmente argillosa con rare laminazioni sabbiosi fini, sub-litoide
23.00 - 27.00	marna siltosa, a tratti debolmente sabbioso fine, da sub-litoide a litoide	

Sondaggio F	<i>Profondità (m)</i>	<i>Descrizione</i>
	0.00 - 1.00	terreno di riporto limo sabbioso consistente con ghiaia eterometrica poligenica e frammenti di laterizi
	1.00 - 3.30	limo sabbioso localmente argilloso consistente con ghiaia eterometrica poligenica e ciottoli
	3.30 - 20.00	limo argilloso localmente sabbioso consistente con ghiaia eterometrica poligenica parzialmente alterata e ciottoli

Sondaggio G	<i>Profondità (m)</i>	<i>Descrizione</i>
	0.00 - 0.10	pavimentazione
	0.10 - 0.70	terreno di riporto laterizi e ciottoli di roccia quarzifica con sabbia grossa limosa
	0.70 - 2.20	blocchi di gneiss quarzifico con limo sabbioso
	2.20 - 7.00	ghiaia eterometrica poligenica ciottoli quarzifici con limo sabbioso debolmente plastico

Sondaggio H	<i>Profondità (m)</i>	<i>Descrizione</i>
	0.00 - 1.50	pavimentazione in conglomerato bituminoso passante a mattoni e blocchi di quarzite e conglomerato di cemento
	1.50 - 6.00	limo sabbioso passante a limo argilloso consistente con ghiaia eterometrica poligenica parzialmente alterata
	6.00 - 8.00	sabbia limosa addensata

Sondaggio I	<i>Profondità (m)</i>	<i>Descrizione</i>
	0.00 - 4.50	terreno di riporto limo sabbioso moderatamente consistente moderatamente addensato con rara ghiaia alterata e rari frammenti di laterizi
	4.50 - 6.70	ghiaia eterometrica poligenica parzialmente alterata ciottoli e limo sabbioso plastico addensato da moderatamente consistente a consistente
	6.70 - 7.40	limo sabbioso addensato da consistente a molto consistente
	7.40 - 7.60	sabbia grossa limosa
	7.60 - 12.00	limo sabbioso addensato da consistente a molto consistente
	12.00 - 14.50	ghiaia eterometrica poligenica parzialmente alterata ciottoli e limo sabbioso passante a sabbia limosa addensata da moderatamente consistente a molto consistente
	14.50 - 15.00	blocco di roccia quarzifica
15.00 - 20.00	sabbia grossa e media moderatamente addensata e ghiaia eterometrica poligenica alterata	

Sondaggio J	<i>Profondità (m)</i>	<i>Descrizione</i>
	0.00 - 0.20	terreno vegetale limo sabbioso
	0.20 - 3.40	limo sabbioso debolmente plastico addensato consistente e ghiaia eterometrica poligenica parzialmente alterata
	3.40 - 4.20	limo sabbioso plastico moderatamente consistente con ghiaia eterometrica poligenica a volte alterata
	4.20 - 8.00	limo sabbioso passante a limo argilloso molto consistente molto addensato con ghiaia eterometrica poligenica e ciottoli
	8.00 - 15.30	limo argilloso sabbioso molto consistente molto addensato
	15.30 - 17.10	limo argilloso da consistente a molto consistente con ghiaia eterometrica poligenica e ciottoli
17.10 - 20.00	limo argilloso sabbioso molto addensato da consistente a molto consistente	

Sondaggio K	<i>Profondità (m)</i>	<i>Descrizione</i>
	0.00 - 5.50	terreno di riporto limo sabbioso passante a sabbia limosa con ghiaia e frammenti di laterizi
	5.50 - 12.60	sabbia media e fine da limosa a con limo moderatamente addensata da moderatamente consistente a molto consistente
	12.60 - 13.50	sabbia media limosa con rara ghiaia eterometrica poligenica parzialmente alterata
	13.50 - 17.50	sabbia media e fine da limosa a con limo poco addensata da moderatamente consistente a molto consistente
	<u>17.50 - 20.00</u>	<u>limo sabbioso consistente</u>

Sondaggio L	<i>Profondità (m)</i>	<i>Descrizione</i>
	0.00 - 6.30	terreno di riporto limo sabbioso sabbia limosa con ghiaia e frammenti di laterizi
	6.30 - 12.00	sabbia media e fine da limosa con limo poco addensata da moderatamente consistente a molto consistente
	12.00 - 13.10	sabbia media limosa moderatamente addensata con ghiaia eterometrica poligenica
	13.10 - 14.30	sabbia media e fine limosa consistente
14.30 - 20.00	sabbia media e fine limosa molto addensata consistente con ghiaia eterometrica poligenica localmente passante a limo sabbioso molto consistente	

Sondaggio M	<i>Profondità (m)</i>	<i>Descrizione</i>
	0.00 - 0.10	pavimentazione in conglomerato bituminoso
	0.10 - 4.50	terreno di riporto ghiaia eterometrica poligenica con limo argilloso e sabbioso abbondanti frammenti di laterizi passante a limo argilloso debolmente plastico consistente con rara ghiaia e frammenti di laterizi
	4.50 - 15.00	limo sabbioso consistente

Sondaggio N	<i>Profondità (m)</i>	<i>Descrizione</i>
	0.00 - 1.10	terreno di riporto limo sabbioso con abbondanti frammenti di laterizi
	1.10 - 2.40	limo argilloso debolmente sabbioso plastico
	2.40 - 14.40	limo sabbioso debolmente plastico consistente
	14.40 - 14.80	blocco di arenaria
	14.80 - 20.00	limo sabbioso debolmente plastico consistente

Sondaggio O	<i>Profondità (m)</i>	<i>Descrizione</i>
	0.00 - 5.00	terreno di riporto frammenti di laterizi con matrice di sabbia grossolana debolmente limosa passante a limo argilloso e sabbioso plastico con ghiaia eterometrica poligenica
	5.00 - 7.50	limo argilloso plastico consistente
	7.50 - 15.00	limo sabbioso consistente

Tabella 5.1 – Stratigrafie sondaggi banca dati arpa [5]

5.3 Carotaggi in corrispondenza dell'evento franoso avvenuto

Nelle immagini sottostanti sono riportati i posizionamenti planimetrici dei carotaggi continui le cui stratigrafie saranno raccolte nelle pagine successive.

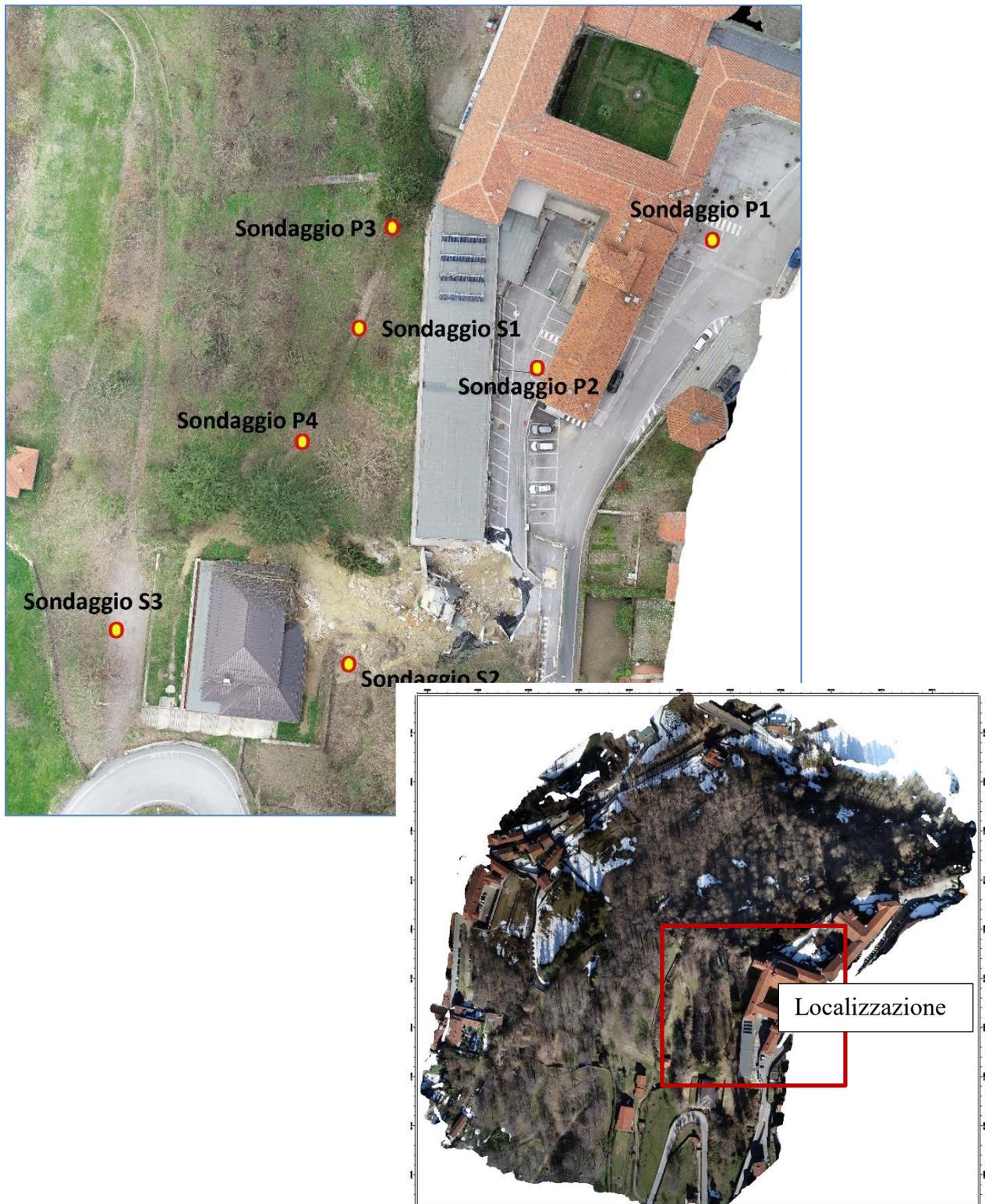


Fig.5.4 - Localizzazione sondaggi eseguiti nel 2019

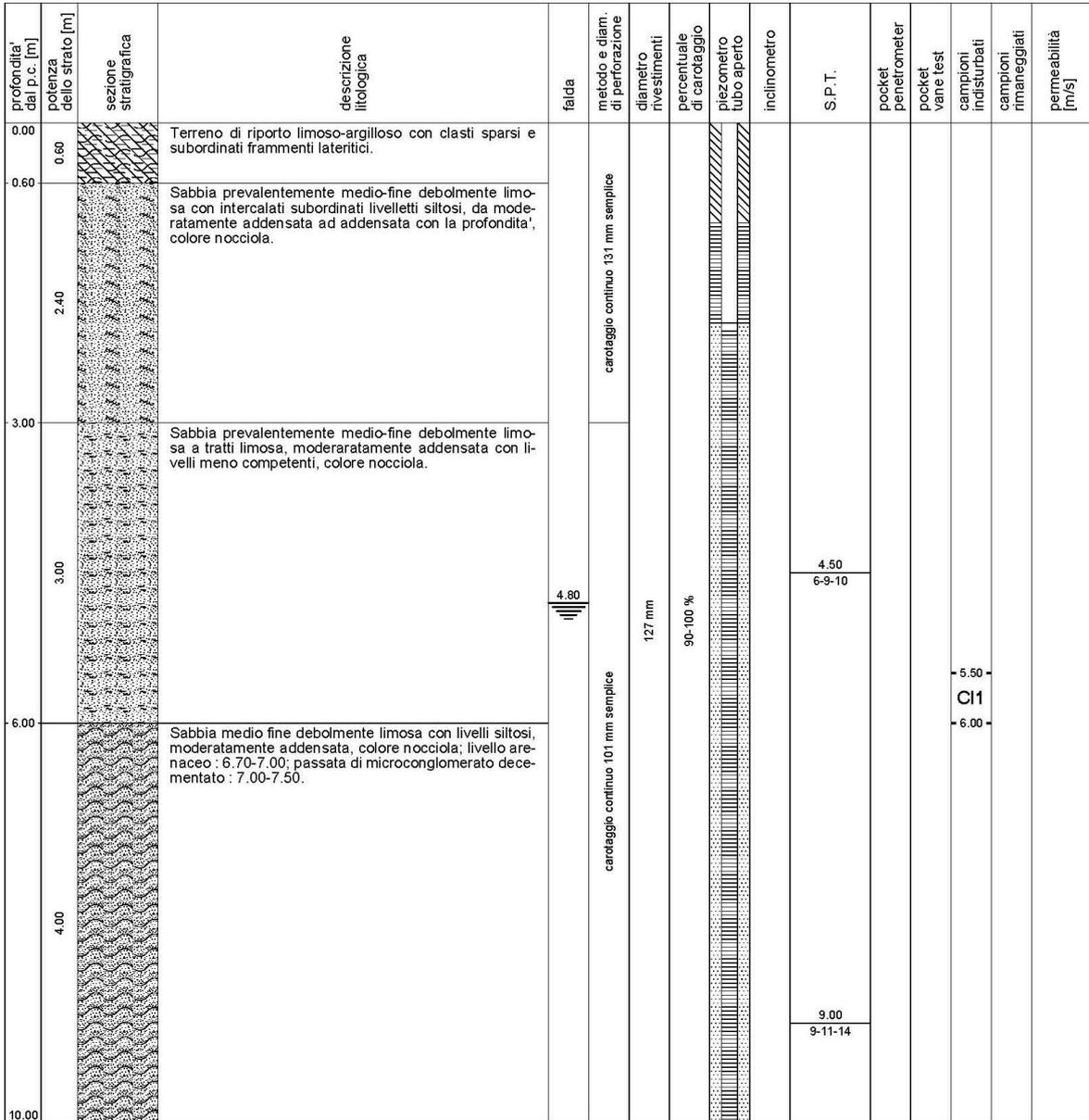
 <p>Decreto di autorizzazione n. 4965 del 04/06/2010 per esecuzione e certificazione di indagini geostatiche e prove in sito ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. n. 380/01</p>	Mod. 7.5.4 rev. 00	RILIEVO STRATIGRAFICO DI PERFORAZIONE	UNI EN ISO 22475-1:2007 UNI EN ISO 14688-1:2003 e 14689-1:2004	SONDAGGIO
	Committente	Provincia di Cuneo		S1
	Cantiere	Indagine geostatica - Studio movimento franoso del 29/12/2017		Pagina 1 di 1
	Località	Mondovì (CN) - Istituto Alberghiero e palestra Metavia	Commessa n. 19002	Lo Sperimentatore Dr. A. Cantù
Perforazione	inizio: 23/01/2019	fine: 24/01/2019	Sonda: Geomarc GM 600	
Coordinate:	N= 44°23'26.72"	E= 7°49'35.96"	Scala 1 : 50	
Accettazione n. 19002	Certificato n. 19002/01	del 28/01/2019		

profondità dal p.c. [m]	potenza dello strato [m]	sezione stratigrafica	descrizione litologica	falda	metodo e diam. di perforazione	diametro rivesimenti	percentuale di carotaggio	piezometro tubo aperto	inclinometro	S.P.T.	pocket penetrometer	pocket vane test	campioni indisturbati	campioni rimanecciati	permeabilità [m/s]
0.00	5.30		Terreno di riporto limoso-argilloso talora debolmente sabbioso fine con clasti sparsi e subordinati frammenti lateritici centimetrici (max 4-5 cm) prevalentemente ad inizio strato, poco consistente, colore nocciola.		carotaggio continuo 131 mm semplice					3.00 2-2-2					
5.30	1.20		Limo argilloso-debolmente sabbioso fine con intercalati subordinati livelletti sabbiosi fini, poco consistente, colore nocciola.							6.00 6-6-8			5.50 C11 6.00		
6.50	3.50		Sabbia medio-fine limosa con intercalate laminazioni siltose, da poco a moderatamente addensata con livelli meno competenti, colore nocciola.		carotaggio continuo 101 mm semplice	127 mm	90-100 %			9.00 9-12-13					
10.00	5.00		Sabbia medio-fine siltosa con subordinate laminazioni limoso-siltose; livello arenaceo : 10.00-10.15; passata con livelli centimetrici arenacei : 12.50-13.00; da addensata a molto addensata, colore nocciola.							12.00 18-26-32					
15.00															

Deposito cassette - cantiere
FALDA NON RILEVATA

Fig.5.5 – Sondaggio S1

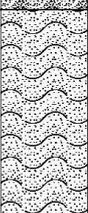
 <p>Decreto di autorizzazione n. 4965 del 04/06/2010 per esecuzione e certificazione di indagini geognostiche e prove in sito ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. n. 380/01</p>	Mod. 7.5.4 rev. 00	RILIEVO STRATIGRAFICO DI PERFORAZIONE <small>UNI EN ISO 22475-1:2007 UNI EN ISO 14698-1:2003 e 14689-1:2004</small>	SONDAGGIO
	Committente	Provincia di Cuneo	S2
	Cantiere	Indagine geognostica - Studio movimento franoso del 29/12/2017	Pagina 1 di 1
	Località	Mondovì (CN) - Istituto Alberghiero e palestra Metavia	Commissa n. 19002
Perforazione	inizio: 25/01/2019 fine: 25/01/2019 Sonda: Geomarc GM 600	Lo Sperimentatore Dr. A. Cantù	Il Direttore del Laboratorio Dr. Geol. Giorgio Sola
Coordinate:	N= 44°23'24.59" E= 7°49'35.77" Scala 1 : 40	<i>A. Cantù</i>	<i>G. Sola</i>
Accettazione n. 19002	Certificato n. 19002/03	del 28/01/2019	



Deposito cassette : cantiere
 Il foro di sondaggio è stato attrezzato per tutta la sua lunghezza con tubo piezometrico in PVC del diametro di 2" con tratto fenestrato compreso tra -2.00m e -10.00m dal p.c..
 Il livello di falda è stato misurato il giorno stesso della fine del sondaggio e quindi necessitano altre misurazioni nei giorni seguenti per avere un valore significativo.

Fig.5.6 – Sondaggio S2

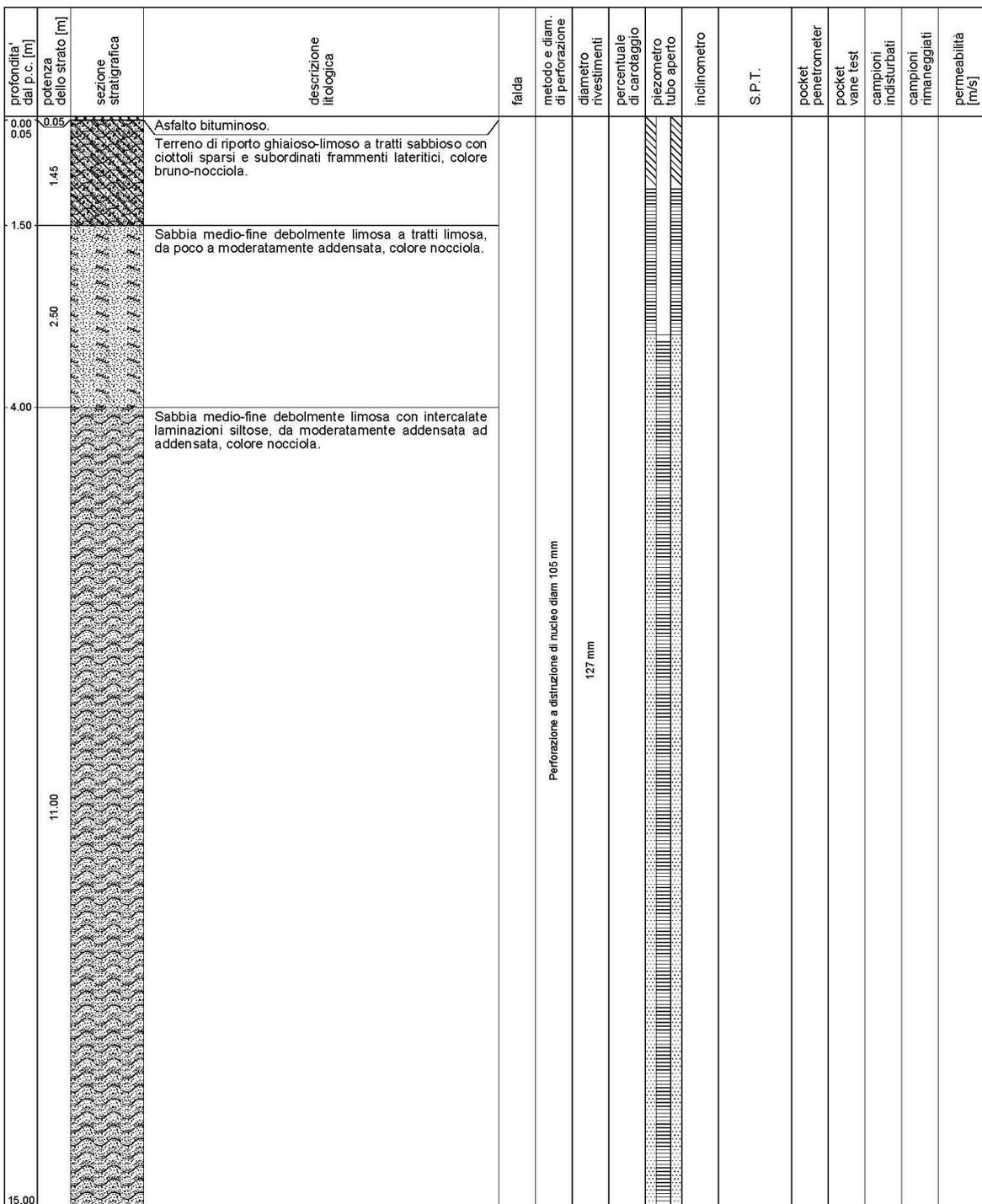
 <p>COMPAGNIA TORINESE MONITORAGGI</p> <p>Decreto di autorizzazione n. 4965 del 04/06/2010 per esecuzione e certificazione di indagini geognostiche e prove in sito ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. n. 380/01</p>	Mod. 7.5.4 rev. 00	RILIEVO STRATIGRAFICO DI PERFORAZIONE <small>UNI EN ISO 22475-1:2007 UNI EN ISO 14888-1:2003 e 14689-1:2004</small>	SONDAGGIO	
	Committente: Provincia di Cuneo	Cantiere: Indagine geognostica - Studio movimento franoso del 29/12/2017	S3	
	Località: Mondovì (CN) - Istituto Alberghiero e palestra Metavia	Perforazione: inizio: 24/01/2019 fine: 25/01/2019 Sonda: Geomarc GM 600	Commissa n. 19002	Pagina 1 di 1
	Coordinate: N= 44°23'24.76" E= 7°49'34.05" Scala 1 : 40	Accettazione n. 19002 Certificato n. 19002/05 del 28/01/2019	Lo Sperimentatore Dr. A. Carù	Il Direttore del Laboratorio Dr. Geol. Giorgio Sola

profondità dal p.c. [m]	potenza dello strato [m]	sezione stratigrafica	descrizione litologica	falda	metodo e diam. di perforazione	diametro rivestimenti	percentuale di carotaggio	piezometro tubo aperto	inclinometro	S.P.T.	pocket penetrometer	pocket vane test	campioni indisturbati	campioni rimaneggiati	permeabilità [m/s]
0.00	0.60		Rilevato stradale ghiaioso fine-sabbioso con subordinati frammenti lateritici millimetrici.												
0.60	0.90		Terreno di riporto limoso-argilloso con clasti sparsi e subordinati frammenti lateritici millimetrici.		carotaggio continuo 131 mm semplice										
1.50	2.70		Limo argilloso-sabbioso, poco consistente, colore nocciola-brunastro.							3.00 3-4-4					
4.20	3.80		Sabbia prevalentemente medio-fine con subordinate laminazioni siltose, debole ossidazione, da poco a moderatamente addensata con la profondità, colore nocciola.		carotaggio continuo 101 mm semplice	127 mm	90-100 %								
8.00	2.00		Come sopra, da moderatamente addensata ad addensata con la profondità.							9.00 15-19-20					
10.00															

Deposito cassette - cantiere
 FALDA NON RILEVATA
 Il foro di sondaggio è stato ritombato al termine della perforazione.

Fig.5.7 – Sondaggio S3

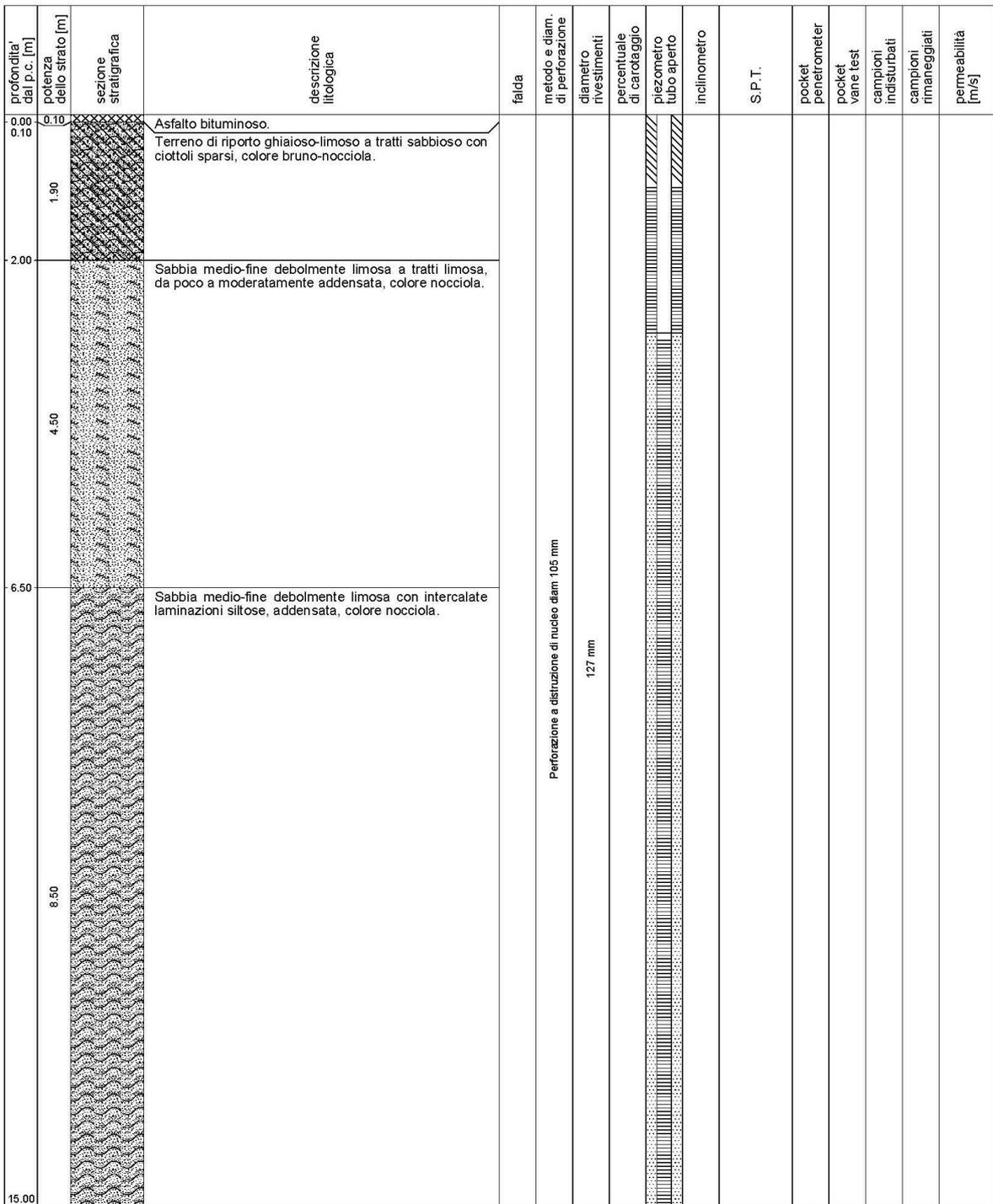
 <p>Decreto di autorizzazione n. 4965 del 04/06/2010 per esecuzione e certificazione di indagini geognostiche e prove in sito ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. n. 380/01</p>	Mod. 7.5.4 rev. 00	RILIEVO STRATIGRAFICO DI PERFORAZIONE	UNI EN ISO 22475-1:2007 UNI EN ISO 14698-1:2003 e 14689-1:2004	SONDAGGIO
	Committente	Provincia di Cuneo		P1
	Cantiere	Indagine geognostica - Studio movimento franoso del 29/12/2017		Pagina 1 di 1
	Località	Mondovì (CN) - Istituto Alberghiero e palestra Metavia	Commissa n. 19002	Il Direttore del Laboratorio Dr. Geol. Giorgio Sola
	Perforazione inizio: 20/02/2019 fine: 20/02/2019 Sonda: Geomarc GM 600	Coordinate: N= 44°23'27.05" E= 7°49'38.75" Scala 1 : 50	Lo Sperimentatore Dr. A. Cantù	
	Accettazione n. 19002	Certificato n. 19002/13 del 21/02/2019		



Il foro di sondaggio è stato attrezzato per tutta la sua lunghezza con tubo piezometrico in PVC del diametro di 2" con tratto fenestrato compreso tra -3.00m e -15.00m dal p.c.. In data 20/2/2019 la misura piezometrica rileva presenza di acqua alla profondità di -13.00m (probabile acqua di perforazione non ancora assorbita).
FALDA ASSENTE

Fig.5.8 – Sondaggio P1

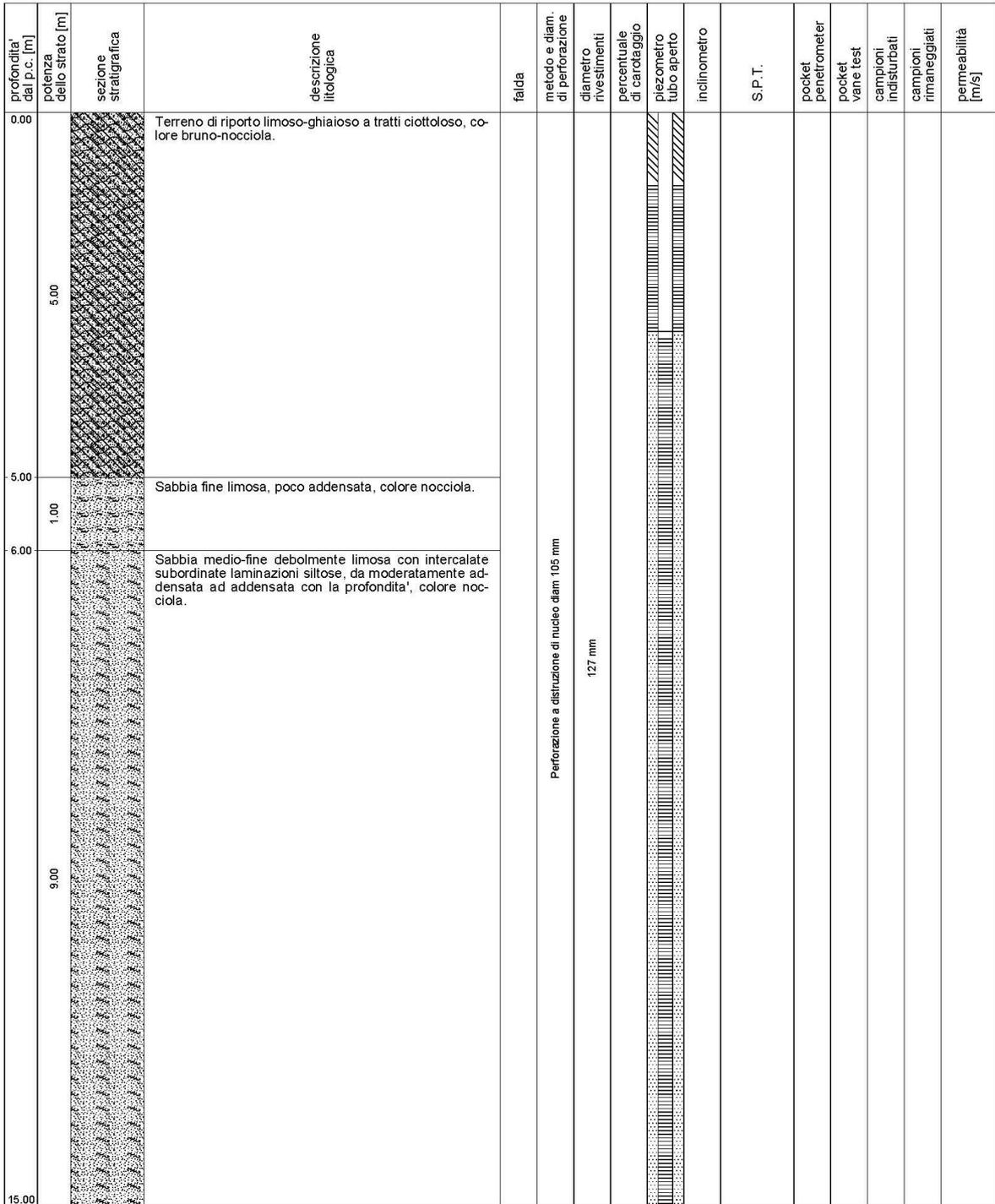
 <p>Decreto di autorizzazione n. 4965 del 04/06/2010 per esecuzione e certificazione di indagini geognostiche e prove in sito ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. n. 380/01</p>	Mod. 7.5.4 rev. 00	RILIEVO STRATIGRAFICO DI PERFORAZIONE <small>UNI EN ISO 22475-1:2007 UNI EN ISO 14688-1:2003 e 14689-1:2004</small>	SONDAGGIO
	Committente	Provincia di Cuneo	P2
	Cantiere	Indagine geognostica - Studio movimento franoso del 29/12/2017	Pagina 1 di 1
	Località	Mondovì (CN) - Istituto Alberghiero e palestra Metavia	Commissa n. 19002
	Perforazione	inizio: 19/02/2019 fine: 19/02/2019 Sonda: Geomarc GM 600	Lo Sperimentatore Dr. A. Cantù
	Coordinate:	N= 44°23'26.44" E= 7°49'37.28" Scala 1 : 50	Il Direttore del Laboratorio Dr. Geol. Giorgio Sola
	Accettazione n. 19002	Certificato n. 19002/12 del 21/02/2019	



Il foro di sondaggio è stato attrezzato per tutta la sua lunghezza con tubo piezometrico in PVC del diametro di 2" con tratto fenestrato compreso tra -3.00m e -15.00m dal p.c.
FALDA ASSENTE

Fig.5.9 – Sondaggio P2

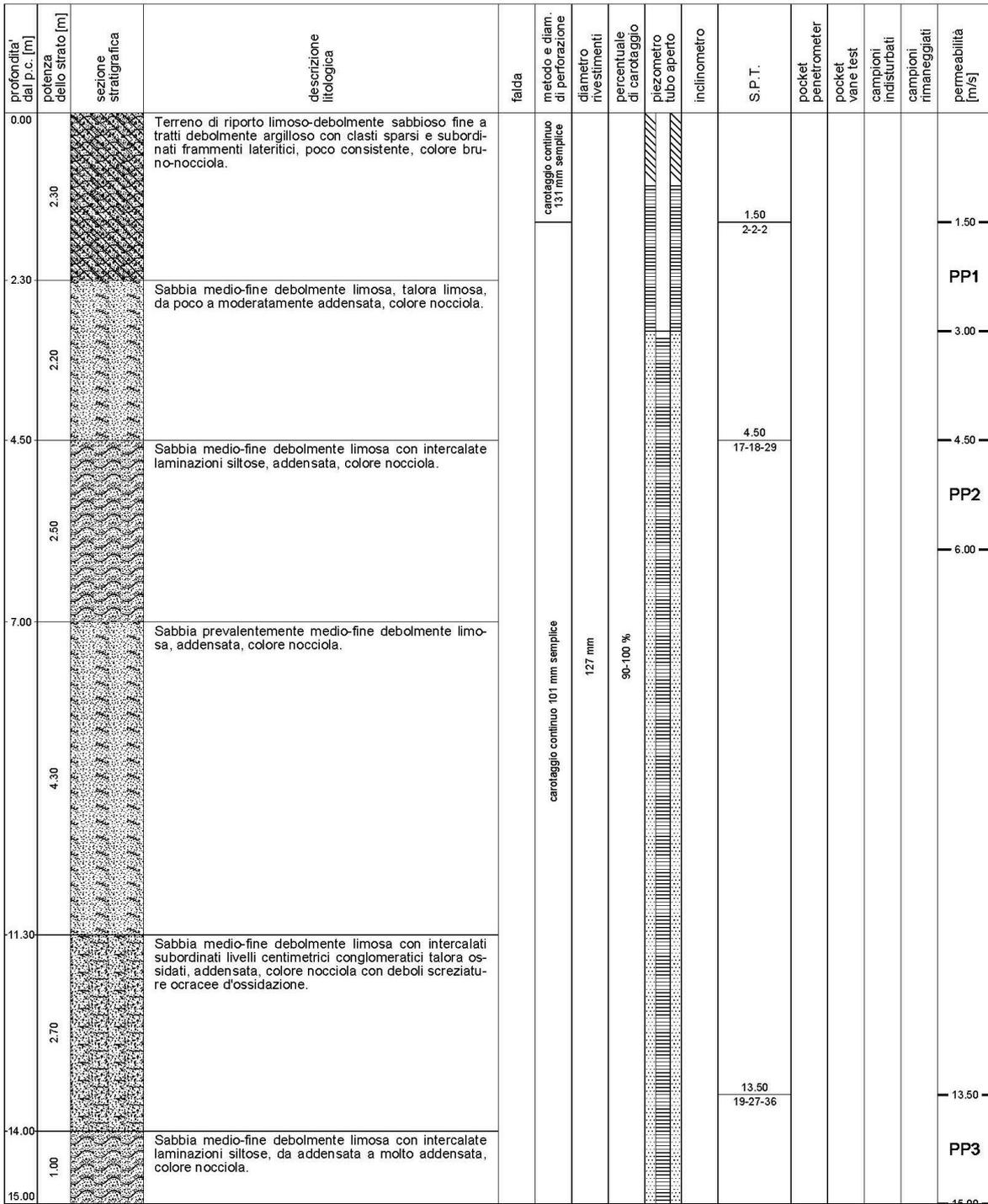
 <p>Decreto di autorizzazione n. 4965 del 04/06/2010 per esecuzione e certificazione di indagini geognostiche e prove in sito ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. n. 380/01</p>	Mod. 7.5.4 rev. 00	RILIEVO STRATIGRAFICO DI PERFORAZIONE	UNI EN ISO 22475-1:2007 UNI EN ISO 14688-1:2003 e 14689-1:2004	SONDAGGIO P3
	Committente	Provincia di Cuneo		Pagina 1 di 1
	Cantiere	Indagine geognostica - Studio movimento franoso del 29/12/2017		
	Località	Mondovì (CN) - Istituto Alberghiero e palestra Metavia	Commissa n.	19002
	Perforazione	inizio: 18/02/2019 fine: 18/02/2019	Sonda: Geomarc GM 600	Lo Sperimentatore Dr. A. Cantù
	Coordinate:	N= 44°23'27.22" E= 7°49'35.84"	Scala 1 : 50	Il Direttore del Laboratorio Dr. Geol. Giorgio Sola
	Accettazione n. 19002	Certificato n. 19002/11	del 21/02/2019	



Il foro di sondaggio è stato attrezzato per tutta la sua lunghezza con tubo piezometrico in PVC del diametro di 2" con tratto fenestrato compreso tra -3.00m e -15.00m dal p.c..
In data 20/02/2019 la misura piezometrica rileva presenza di acqua alla profondità di -13.00m (probabile acqua di perforazione non ancora assorbita).
FALDA ASSENTE

Fig.5.10 – Sondaggio P3

 <p>COMPAGNIA TORINESE MONITORAGGI</p> <p>Decreto di autorizzazione n. 4965 del 04/06/2010 per esecuzione e certificazione di indagini geognostiche e prove in sito ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. n. 380/01</p>	Mod. 7.5.4 rev. 00	RILIEVO STRATIGRAFICO DI PERFORAZIONE	UNI EN ISO 22475-1:2007 UNI EN ISO 14888-1:2003 e 14689-1:2004	SONDAGGIO
	Committente	Provincia di Cuneo		P4
	Cantiere	Indagine geognostica - Studio movimento franoso del 29/12/2017		Pagina 1 di 1
	Località	Mondovì (CN) - Istituto Alberghiero e palestra Metavia		Commissa n. 19002
Perforazione	inizio: 14/02/2019	fine: 15/02/2019	Sonda: Geomarc GM 600	Lo Sperimentatore Dr. A. Carù
Coordinate:	N= 44°23'25.91"	E= 7°49'35.36"	Scala 1 : 50	Il Direttore del Laboratorio Dr. Geol. Giorgio Sola
Accettazione n. 19002	Certificato n. 19002/09	del 21/02/2019		



Il foro di sondaggio è stato attrezzato per tutta la sua lunghezza con tubo piezometrico in PVC del diametro di 2" con tratto fenestrato compreso tra -3.00m e -15.00m dal p.c..
Deposito cassette: cantiere
FALDA ASSENTE

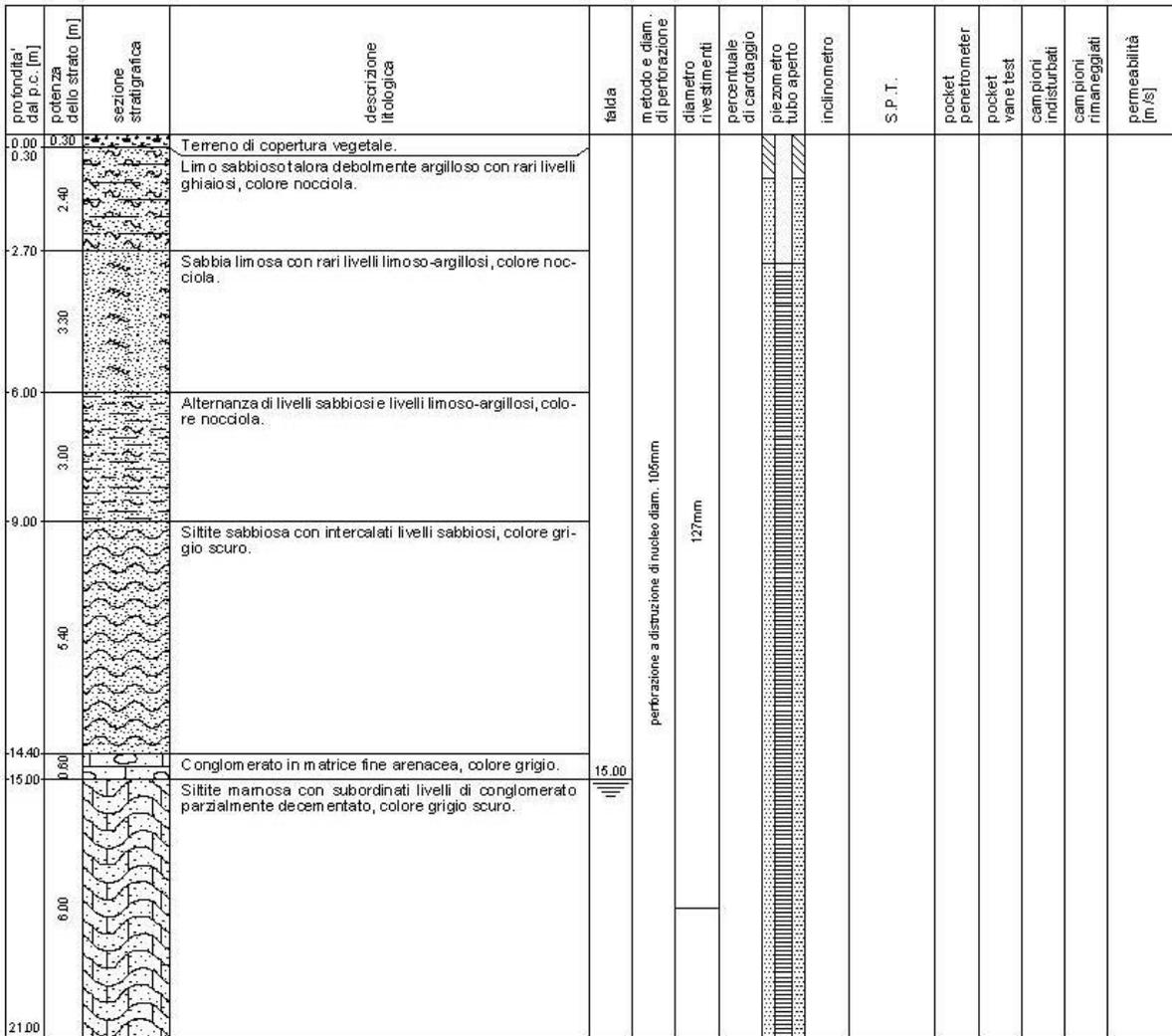
Fig.5.11 – Sondaggio P4

5.3.1 Sondaggi eseguiti nel 2003



Fig.5.12 - Localizzazione sondaggi eseguiti nel 2013

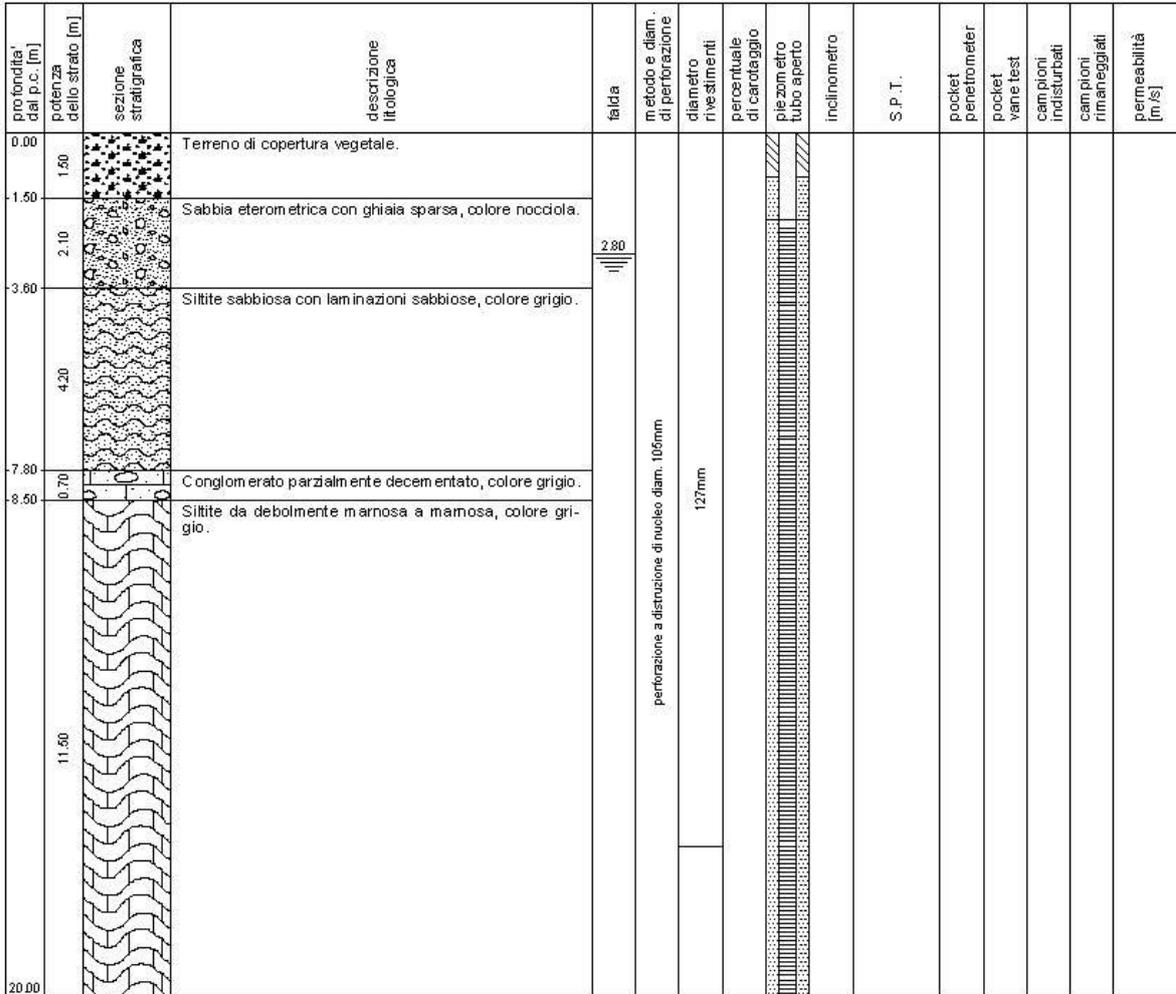
 <p>Decreto di autorizzazione n. 4965 del 04/06/2010 per esecuzione e certificazione di indagini geognostiche e prove in sito ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. n. 380/01</p>	Mod. 7.5.4 rev. 03 RILIEVO STRATIGRAFICO DI PERFORAZIONE	UNI EN ISO 22475-1:2007 UNI EN ISO 14688-1:2003 e 14688-1:2004	SONDAGGIO PZ1	
	Committente Comune di MONDOVI'	Pagina 1 di 1		
	Cantiere Monitoraggio inclino-piezometrico Collina di Mondovì	Località Mondovì (CN) - Frana 35	Comessa n. 11060	Il Direttore del Laboratorio Dr. <i>Geol. Giorgio Sola</i>
	Perforazione inizio: 12/12/2011 fine: 13/12/2011 Sonda: Geomarc G600	Coordinate: N= 44° 23.450' E= 7° 49.561'	Scala 1:100	Lo Sperimentatore Dr. <i>A. Cantu</i>
Accettazione n. 11060	Certificato n. 11060/02	del 30/12/2011		



Il perforo è attrezzato con piezometro a tubo aperto in PVC di diam. 2", finestrato alla profondità da p.c. compresa tra -3.00m e -21.00m. Pozzetto "ACAPITELLO".

Fig.5.13 – Sondaggio PZ1

 <p>Decreto di autorizzazione n. 4965 del 04/06/2010 per esecuzione e certificazione di indagini geognostiche e prove in sito ai sensi dell'art. 29 del D.P.R. n. 350/01</p>	Mod. 7.5.4 rev. 03	RILIEVO STRATIGRAFICO DI PERFORAZIONE	UNI EN ISO 10261:2005 UNI EN ISO 10262:2005 e 14689-1:2004	SONDAGGIO PZ2
	Committente	Comune di MONDOVI'		Pagina 1 di 1
	Cantiere	Monitoraggio inclino-piezometrico Collina di Mondovì		Il Direttore del Laboratorio Dr. Geol. Giorgio Sola
	Località	Mondovì (CN) - Frana 35		Comessa n. 11060 Lo Sperimentatore Dr. A. Cantù
Perforazione	inizio: 14/12/2011	fine: 15/12/2011	Sonda: Geomarc G600	
Coordinate:	N= 44° 23.453'	E= 7° 49.518'	Scala 1:100	
Accettazione n. 11060	Certificato n. 11060/04	del 30/12/2011		



Il perforo è attrezzato con piezometro tipo a tubo aperto in PVC di diam. 2", fessurato alla profondità da p.c. compresa tra -2.00m e -20.00m. Pozzetto CARRABILE.

Fig.5.14 – Sondaggio PZ2

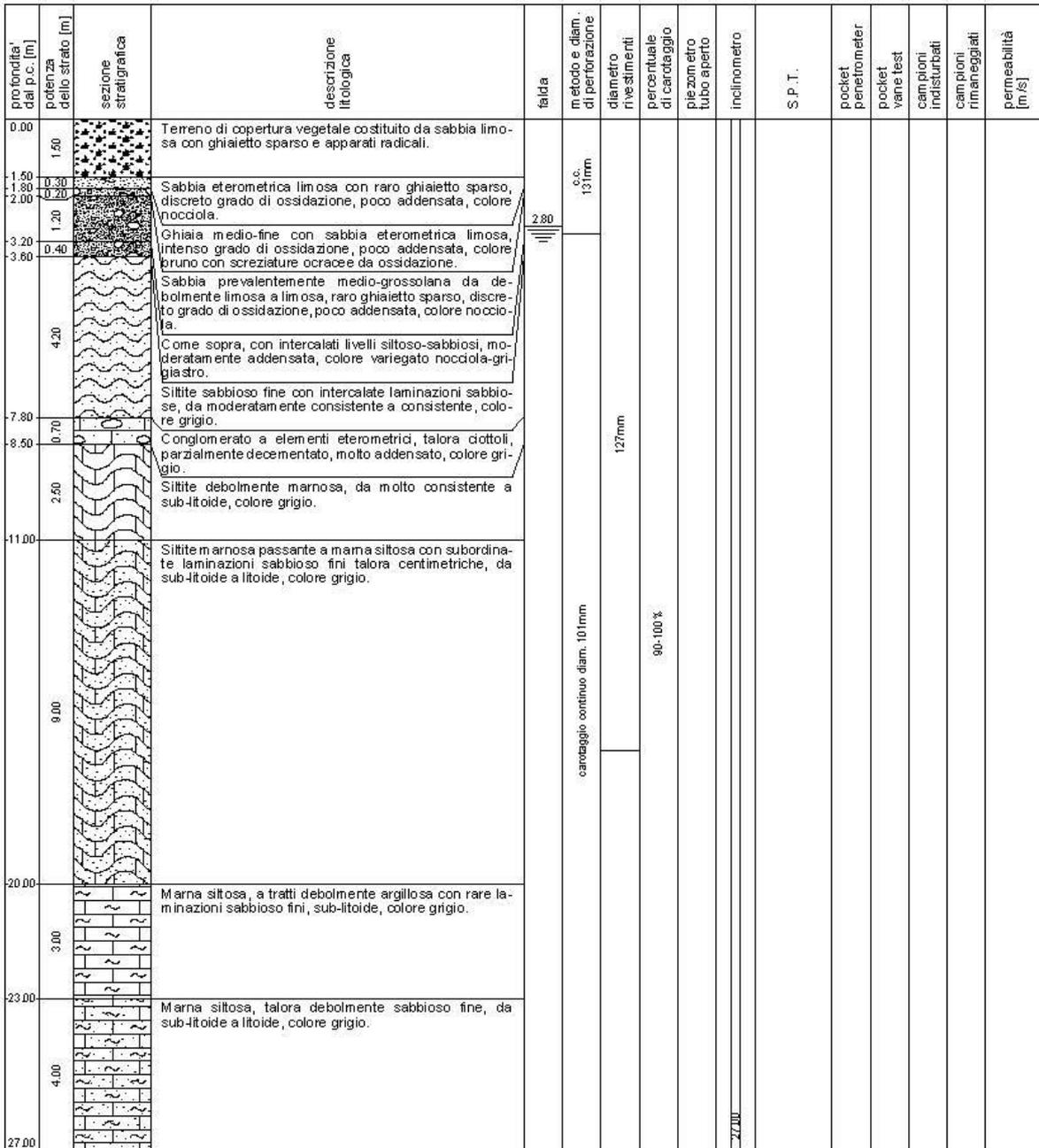
 <p>Decreto di autorizzazione n. 4965 del 04/06/2010 per esecuzione e certificazione di indagini geognostiche e prove in sito ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. n. 390/01</p>	Mod. 75.4 rev. 03	RILIEVO STRATIGRAFICO DI PERFORAZIONE	UNITEC 7255 1200 1485 1200 c. 1485-1200	SONDAGGIO
	Committente	Comune di MONDOVI'		11
	Cantiere	Monitoraggio inclino-piezometrico Collina di Mondovì		Pagina 1 di 1
	Località	Mondovì (CN) - Frana 35	Commissa n. 11060	Lo Sperimentatore Dr. A. Cantù
Perforazione	inizio: 07/12/2011	fine: 09/12/2011	Sonda: Geomarc G600	
Coordinate:	N= 44° 23.450'	E= 7° 49.561'	Scala 1:100	
Accettazione n. 11060	Certificato n. 11060/01	del 30/12/2011		

profondità dal p.c. [m]	potenza dello strato [m]	sezione stratigrafica	descrizione litologica	falda	metodo e diam. di perforazione	diametro rivestimenti	percentuale di carotaggio	piezometro tubo aperto	inclinometro	S.P.T.	pocket penetrometer	pocket vane test	cam pion. indisturbati	cam pion. rimaneggiati	permeabilità [m/s]
0.00 0.30	0.30		Terreno di copertura vegetale costituito da sabbia debolmente limosa con ghiaia sparsa.												
2.70	2.40		Lim o sabbioso talora debolmente e argilloso con intercalati rari livelli cm ghiaioso fini, discreto grado di ossidazione, poco consistente, colore nocciola con screziature ocracee da ossidazione.		c.c. 131mm										
6.00	3.30		Sabbia prevalentemente medio-fine limosa con rari livelli cm limoso-argilloso, intensa laminazione ossidata, poco addensata, colore nocciola-ocraceo.												
9.00	3.00		Alternanza di livelli cm sabbioso fini e analoghi livelli limoso-argilloso, intenso grado di ossidazione, poco addensata, colore nocciola con screziature ocracee.		carotaggio continuo diam. 101mm										
12.00	3.00		Siltite sabbiosa con intercalati livelli cm di sabbia fine, da poco a moderatamente consistente con la profondità, colore grigio scuro.			127mm									
14.40	2.40		Come sopra, consistente, colore grigio scuro.				90-100%								
15.00	0.60		Conglomerato litoide a elementi eterometrici in matrice fine arenacea, colore grigio.	15.00	101mm T2 chiusa										
20.30	5.30		Siltite marnosa a livelli sabbiosa con intercalati livelli pluricentimetrici di conglomerato parzialmente decementato a elementi eterometrici in matrice siltoso-marnosa, da molto consistente a sub-litoide, colore grigio scuro.												
22.00	1.70		Conglomerato parzialmente decementato a elementi prevalentemente minuti in matrice sabbiosa debolmente siltosa talora prevalente, sub-litoide, colore grigio.		c.c. diam. 101mm										
25.00	3.00		Siltite marnosa a tratti sabbiosa con subordinati livelli cm di conglomerato a elementi prevalentemente minuti in matrice sabbioso-siltosa, sub-litoide, colore grigio scuro.												

Il foro di sondaggio è attrezzato con inclinometro fino alla profondità di -24.00m da p.c.. Pozzetto "A CAPITELLO".

Fig.5.15 – Sondaggio I1

 <p>Decreto di autorizzazione n. 4965 del 04/06/2010 per esecuzione e certificazione di indagini geognostiche e prove in sito ai sensi dell'art. 29 del D.P.R. n. 350/01</p>	Mod. 7.5 - rev. 03	RILIEVO STRATIGRAFICO DI PERFORAZIONE	UNITEC 7255 1200 1485 1200 e 1485 1200	SONDAGGIO
	Committente	Comune di MONDOVI'		12
	Cantiere	Monitoraggio inclino-piezometrico Collina di Mondovì		Pagina 1 di 1
	Località	Mondovì (CN) - Frana 35	Commissa n. 11060	Lo Sperimentatore Dr. A. Cantù
Perforazione	inizio: 13/12/2011	fine: 14/12/2011	Sonda: Geomarc G600	
Coordinate:	N= 44° 23.453'	E= 7° 49.518'	Scala 1:100	
Accettazione n. 11060	Certificato n. 11060/03	del 30/12/2011		



Il foro di sondaggio è attrezzato con inclinometro fino a fondo foro. Pozzetto CARRABILE.

Fig.5.16 – Sondaggio I2

5.4 Indagini geofisiche

Le tre immagini seguenti riportano il posizionamento degli stendimenti simici con il primo e ultimo geofono.

Nelle prime due gli stendimenti sismici sono stati collocati in modo tradizionale sul rilievo aerofotogrammetrico presentato sia come curve di livello sia come ortofotografia, mentre nella terza i risultati della elaborazione delle sezioni sismiche sono stati inseriti sul modello tridimensionale a curve di livello, navigabile ed esplorabile con AutoCAD o programmi compatibili.

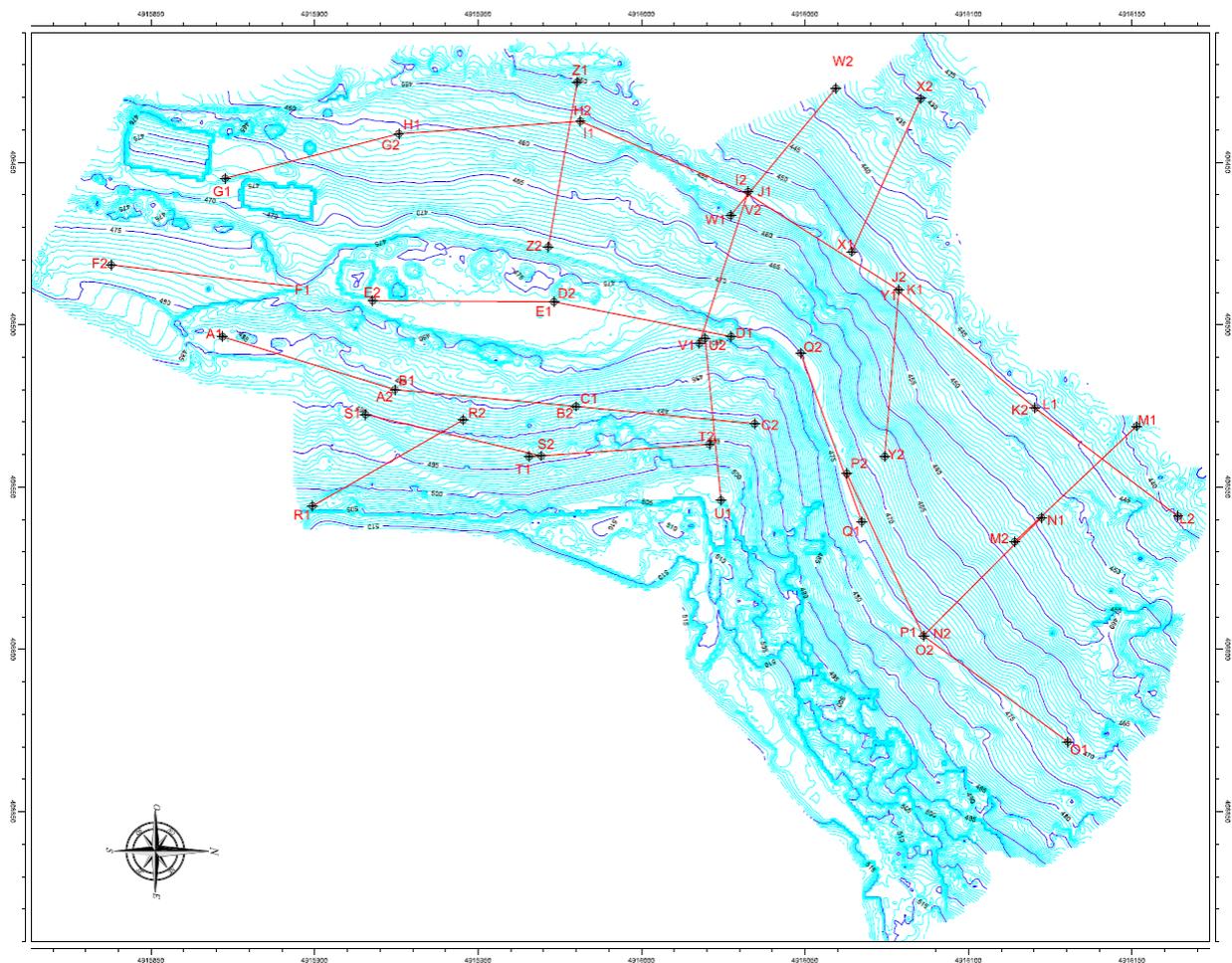


Fig.5.17 – Stendimenti sismici su planimetria di rilievo

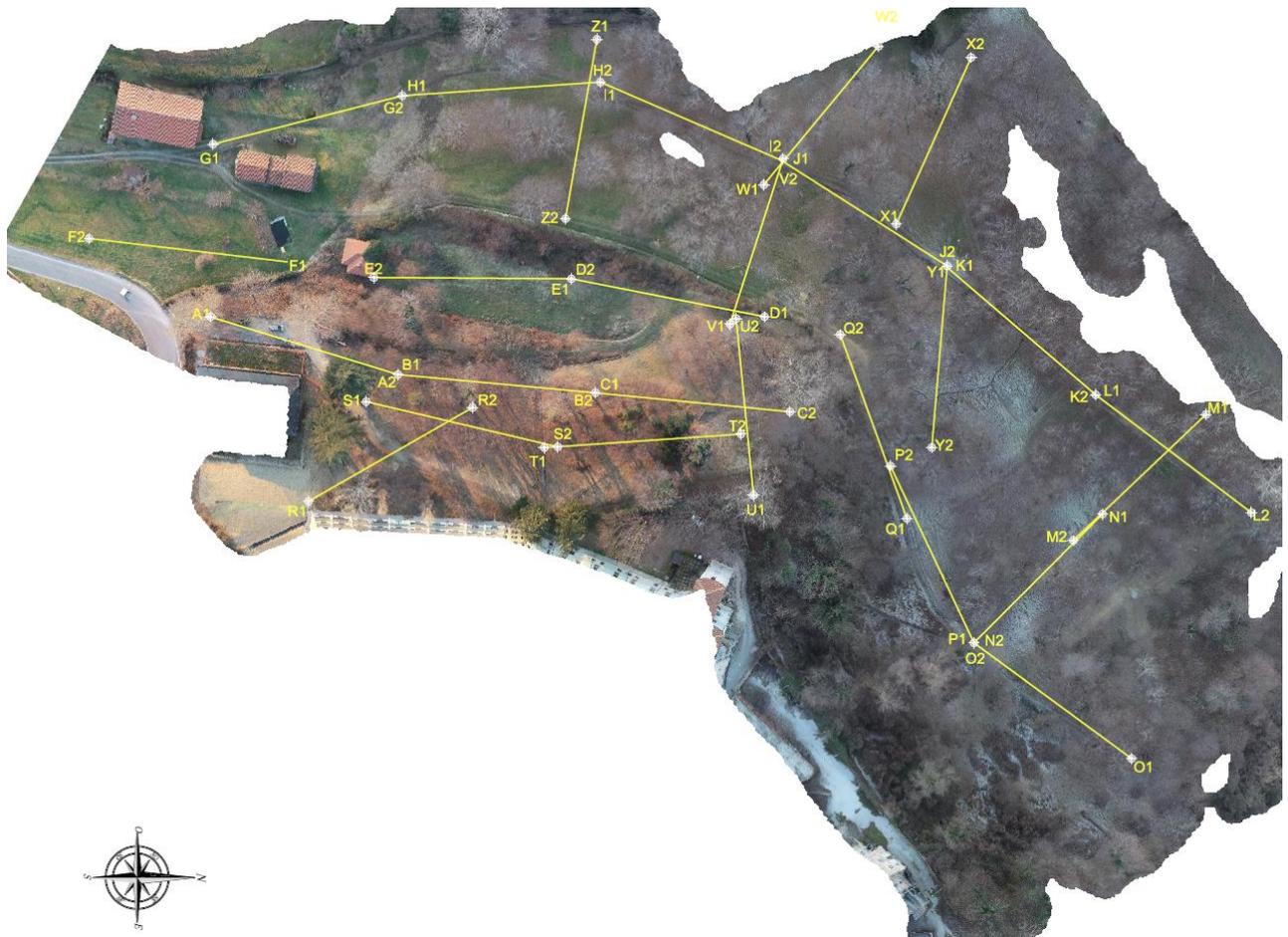


Fig.5.18 – Stendimenti sismici su ortofoto

Sono state eseguiti 26 rilievi sismici a rifrazione basati su stendimenti di 12 geofoni intervallati di 5,0 m l'uno dall'altro.

Per poter effettuare una interpretazione accurata sono stati utilizzati 9 punti di battuta per ogni stendimento: 2 alle estremità della stesa sismica, dopo aver rimosso temporaneamente il primo o l'ultimo geofono, uno tra il 3° ed il 4° geofono, uno centrale, uno tra il 9° ed il 10° geofono, e due battute esterne a ciascuna estremità, tipicamente a distanza di 15 e 30 metri quando possibile ovvero a distanze inferiori allorché le condizioni morfologiche o geometriche del versante non consentivano di portarsi a tali distanze standard.

Per ogni punto di energizzazione sono state effettuate 3 battute, al fine di migliorare la nitidezza del segnale sismico e comunque avere dati di back-up nel caso in cui un rumore sismico casuale avesse disturbato le registrazioni.

Sono state perciò effettuate 27 battute ed altrettante registrazioni per ciascuno stendimento, per un totale di 702 battute e corrispondenti registrazioni.

5.5 Interpretazione indagine sismica a rifrazione

Le linee sismiche hanno evidenziato la presenza di una coltre di copertura costituita da limi sabbiosi debolmente argillosi di scadenti caratteristiche meccaniche del limoso argilloso poco consistente di potenza variabile tra i 3 ed i 9 metri, con velocità variabili tra 339 m/s e 480 m/s, con valore medio 389 m/s e deviazione standard 41 m/s, sovrapposto ad un orizzonte caratterizzato da una velocità variabile tra 982 m/s e 2440 m/s, con valore medio 1574 m/s e deviazione standard 401 m/s.

La tabella 5.2 riporta alcuni valori reperibili nella letteratura scientifica di settore relativi alle velocità di propagazione delle onde di sismiche di compressione (Onde P) in diversi tipi di rocce e di terreni.

Litotipo	Vp (m/s)
Areato superficiale	300 – 800
Sabbia asciutta	500 – 1000
Sabbia umida	600 – 1800
Argilla	1800 -2900
Terreno alluvionale sciolto	400 – 2000
Acqua	1450 -1500
Lava	2500 – 4000
Calcare	3500 – 5000
Arenaria	2500 – 4500
Granito	4000 – 6000
Piroclastite coerente (tufo)	750 – 2500
Piroclastite incoerente	350 - 1000

Tabella 5.2 Velocità onde prime [6]

Mentre nel primo strato è chiara la natura di areato superficiale, cui sicuramente competono scadenti qualità meccaniche, nel secondo strato appare probabile che la natura litologica possa essere identificata, in alcuni casi (dove le velocità sono più alte) da sabbie ben addensate, mentre dove il valore delle velocità delle onde P è pari a circa 1500 m/s si potrebbe aver rilevato la presenza della falda.

5.6 Velocità di propagazione delle onde P

La tabella che riassume le velocità delle onde P è la seguente:

STESA	LIVELLO 1 [m/s]	PROFONDITÀ [m]	LIVELLO 2 [m/s]
A	384.9	8.42	1304.4
B	348.5	8.74	1336.5
C	339.3	7.91	1084.6
D	408.7	5.34	1425.5
E	424.1	3.19	1381
F	441	5.59	1287.5
G	434.5	6.26	2301.7
H	398.2	3.37	2058.6
I	394.2	3.51	1928
J	480	3.82	2012.6
K	388.6	3.99	2440.1
L	362.9	6.67	1746.6
M	354.5	5.18	1547.2
N	360.9	4.02	1480
O	341.6	5.56	1645.7
P	436.3	5.47	1440
Q	436.5	4.14	1215.3
R	376.8	8.32	1093.7
S	327.7	7.7	982.3
T	340	7.56	1079.7
U	345.8	5.46	1044
V	415.3	3.74	1586.3
W	398.5	3.68	1804.4
X	352.6	4.47	1938.3
Y	415.8	5.78	1858.6
Z	416.3	5.31	1915.2
Media	389.4	-	1574.5
Dev. St.	41.5	-	401.3

Tabella 5.3 Velocità onde prime e profondità del livello

Gli elaborati grafici riportati nelle pagine seguenti appaiono particolarmente interessanti in quanto si osserva come il substrato presenti una velocità di propagazione delle Onde P maggiore nella sezione di valle del versante (Isotache della Seconda Unità), ed al contempo si osserva come la potenza dello strato superficiale, meccanicamente più scadente, si presenti, in corrispondenza dell'Edificio Storico, ridotta rispetto a quella presente nella sezione meridionale, in cui lo spessore della prima Unità Geotecnica sala a 8-9 m rispetto alla potenza di 5-6 m rilevata in corrispondenza del corpo più antico del complesso.

5.7 Curva Isotache (velocità onde P)

Grazie all'elevato numero di stese sismiche, omogeneamente distribuite sull'area di indagine, è stato possibile redigere carte di ugual velocità delle onde P, relative all'orizzonte superficiale (Unità C nella Relazione del Prof. Barla) all'orizzonte profondo (Unità D o livello dell'acqua).

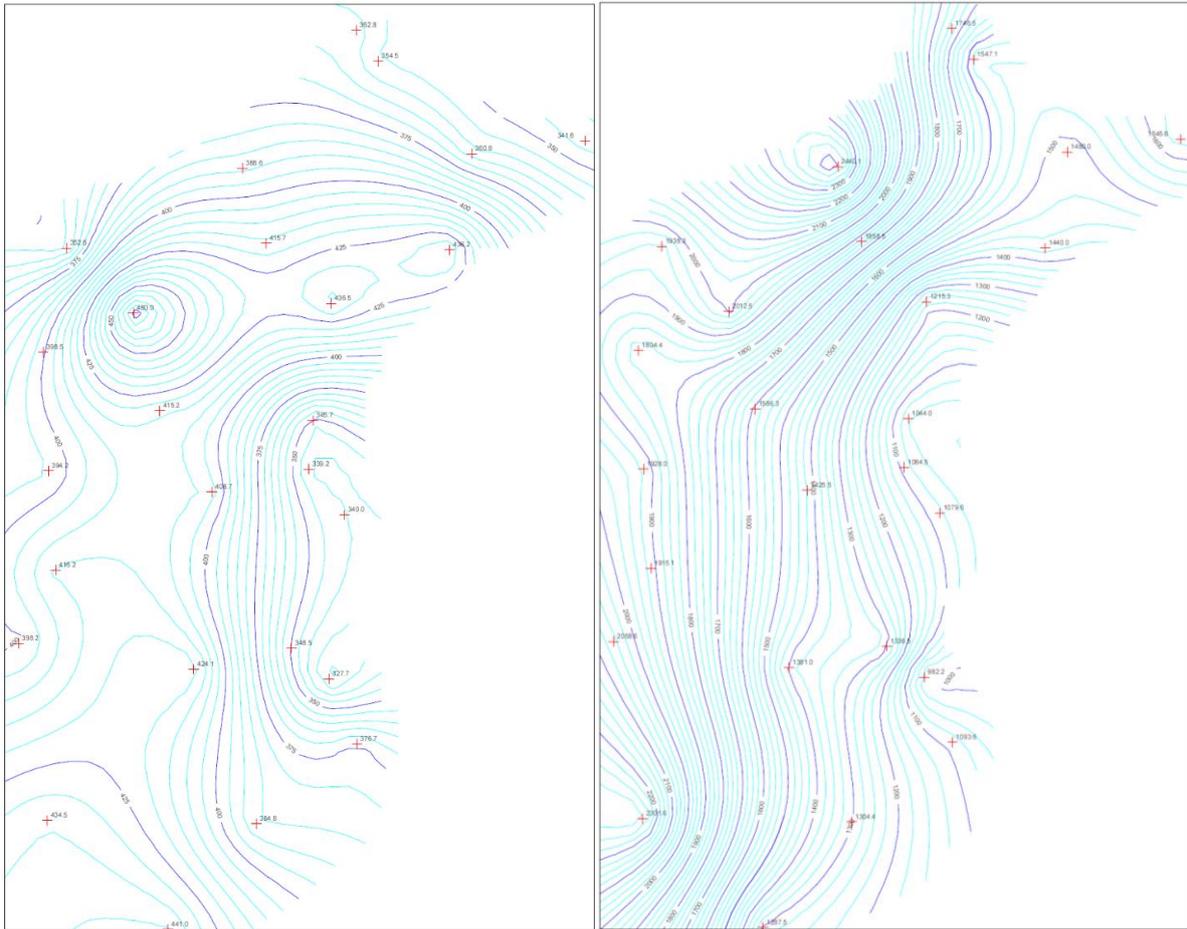


Fig.5.19 - Estratto delle curve isotache del livello 1 e 2

5.8 Curva Isopache prima Unità (Spessore dello strato)

Grazie all'elevato numero di stese sismiche, omogeneamente distribuite sull'area di indagine, è stato possibile redigere carte di ugual potenza dell'orizzonte superficiale

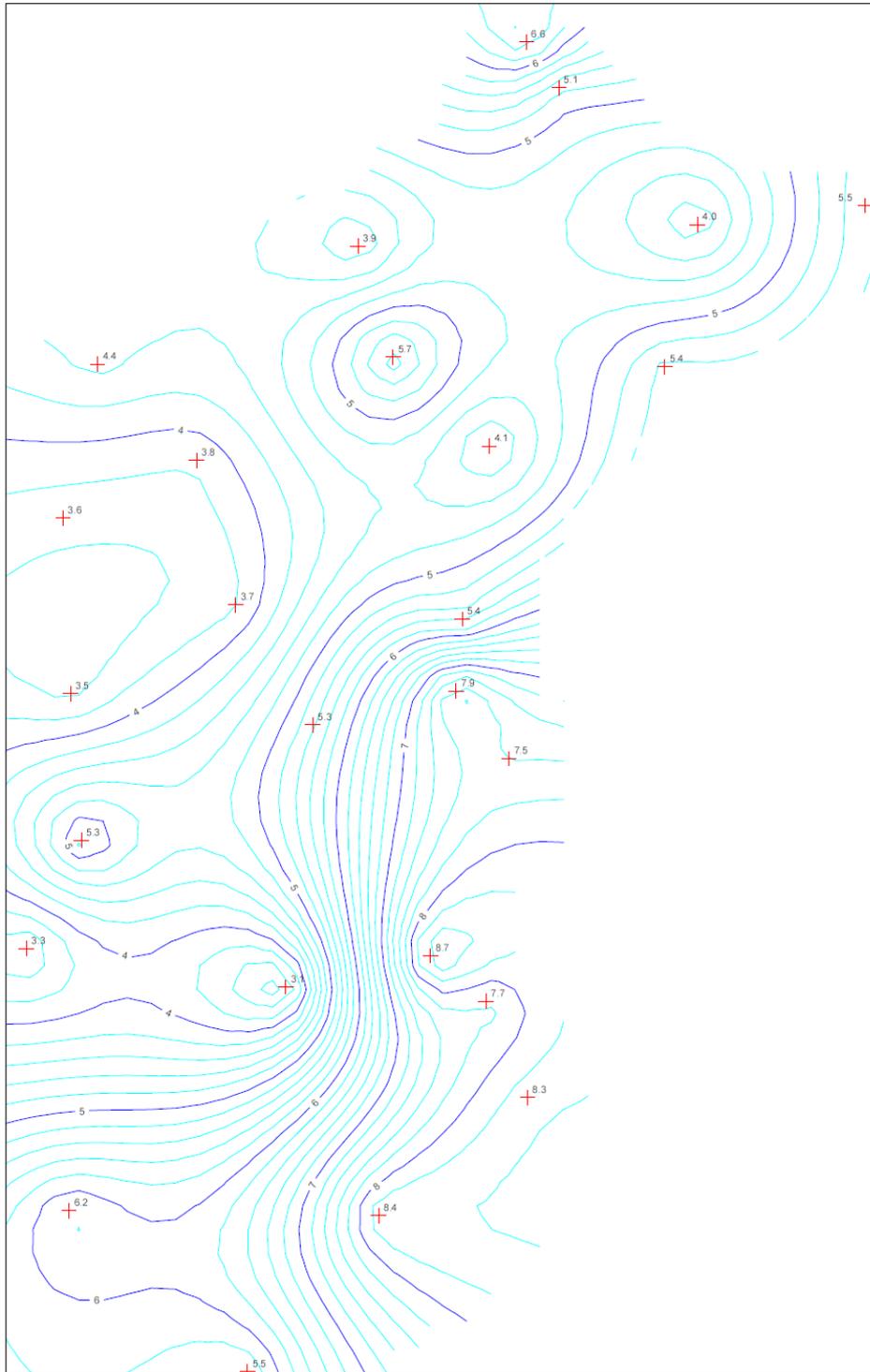


Fig.5.20 – Profondità interfaccia livello 1-2

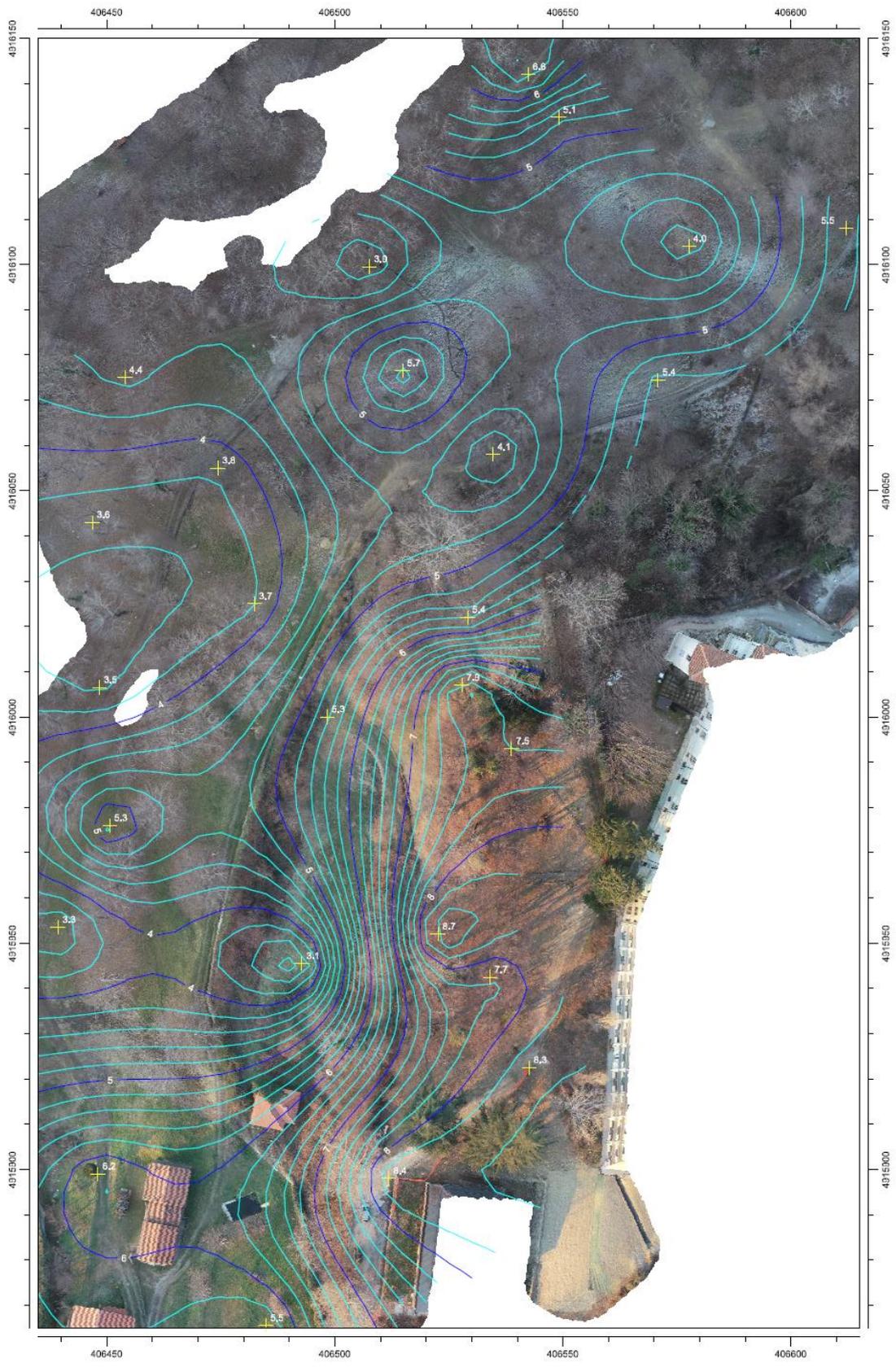


Fig.5.21 – Profondità interfaccia livello 1-2 su ortofoto

5.8.1 Elaborati dei singoli stendimenti

Le immagini seguenti esemplificano gli elaborati individuali di ciascuno stendimento.

In particolare, vengono riportati un sismogramma, una elaborazione di dromocrone ed un elaborato che presenta la profondità del rifrattore identificato. Ci si limita ad un singolo esempio in quanto gli elaborati relativi ai 26 stendimenti sono 286, i risultati sono raccolti negli elaborati di sintesi già presentati e non è quindi il caso di presentarli in questa sede.

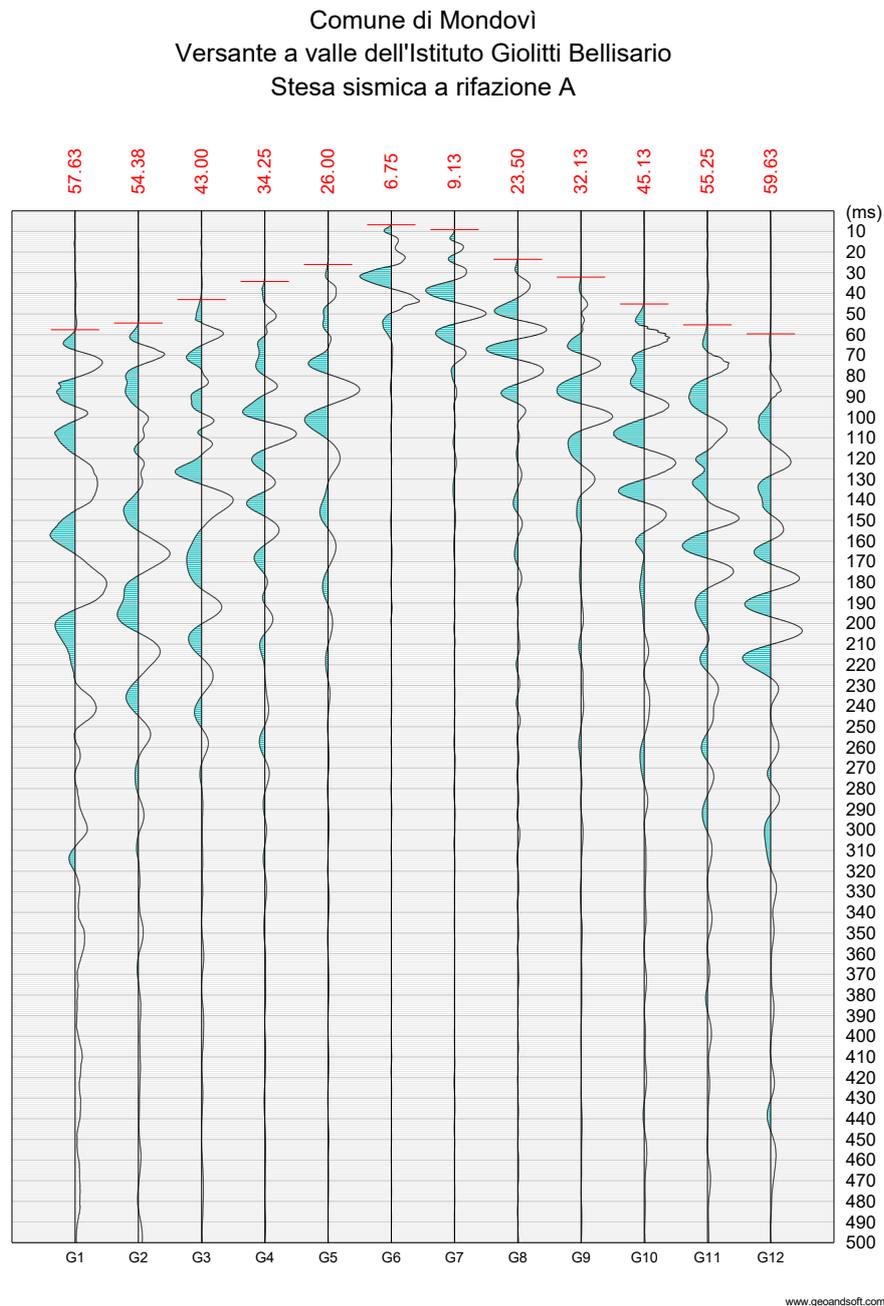
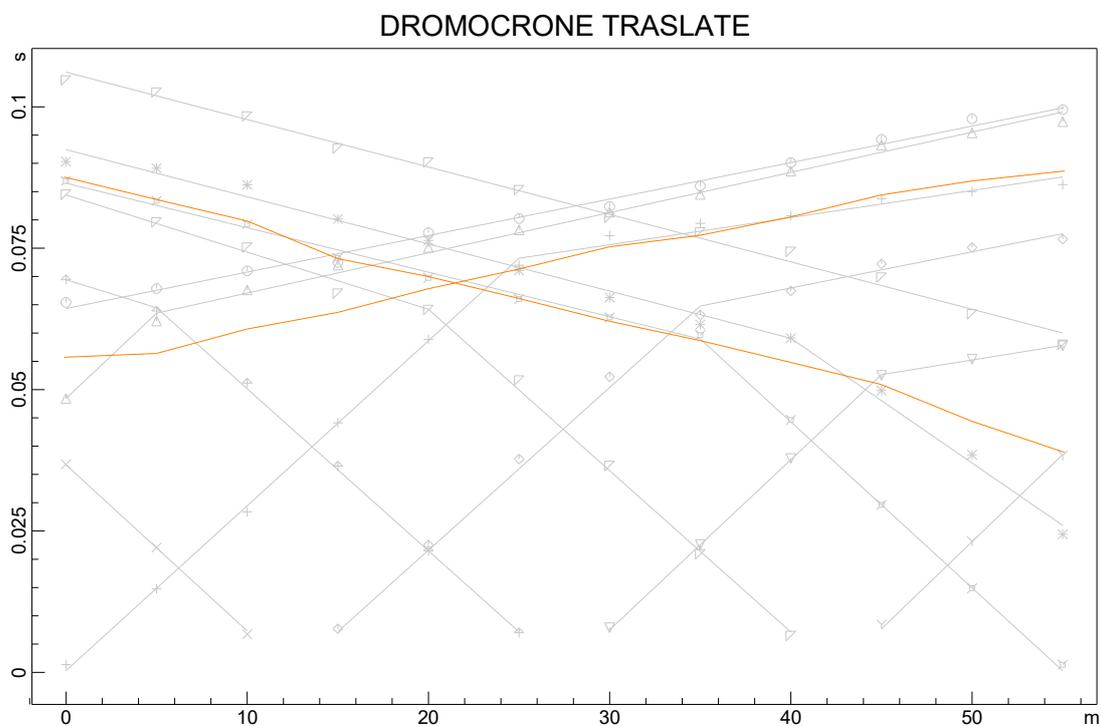
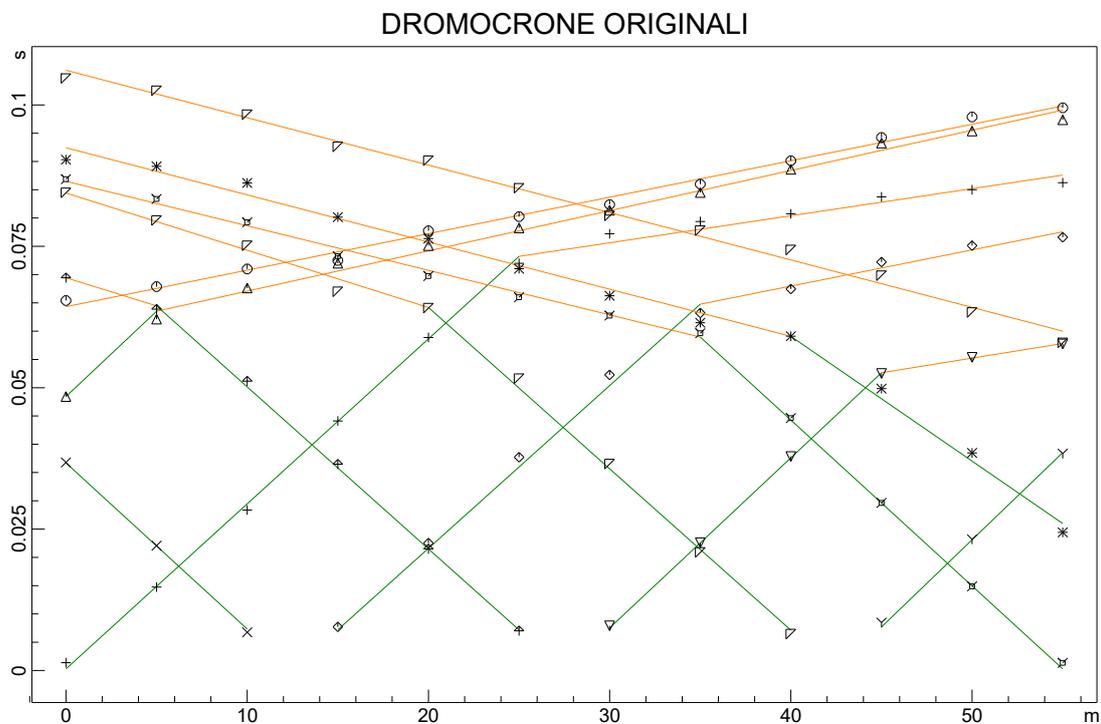


Fig.5.22 – Onde sismiche

Comune di Mondovì
Versante a valle dell'Istituto Giolitti Bellisario
Stesa sismica a rifazione B



www.geoandsoft.com

Fig.5.23 – Dromocrona

Comune di Mondovì
Versante a valle dell'Istituto Giolitti Bellisario
Stesa sismica a rifazione C

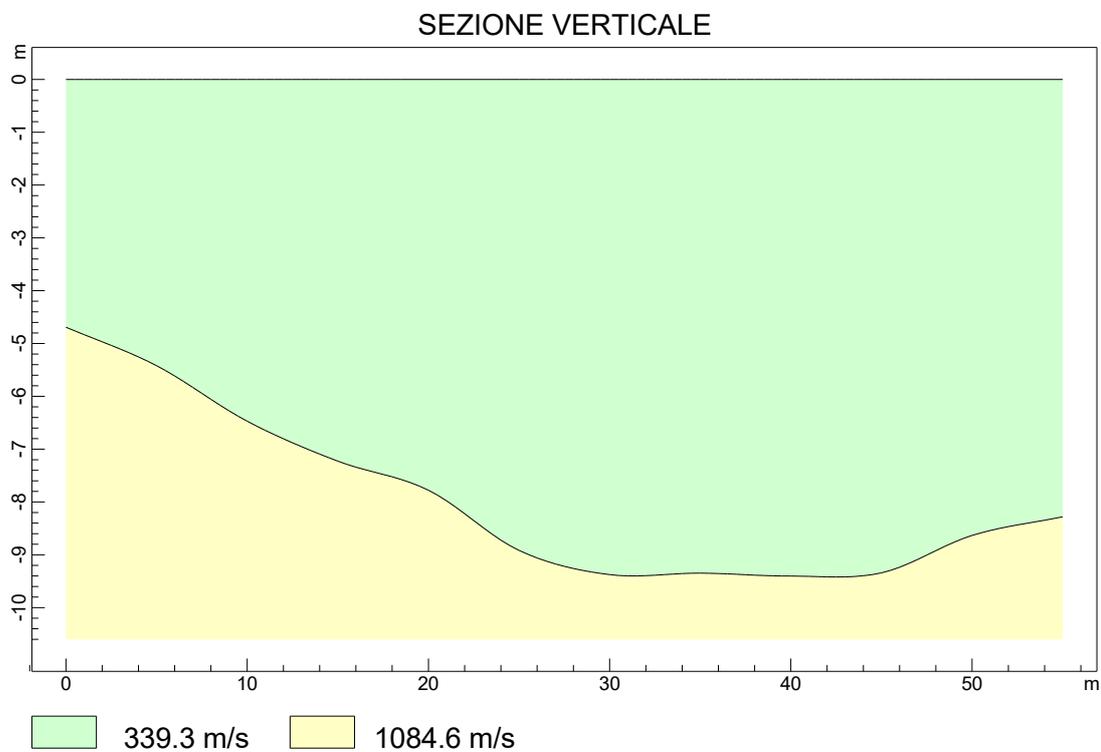
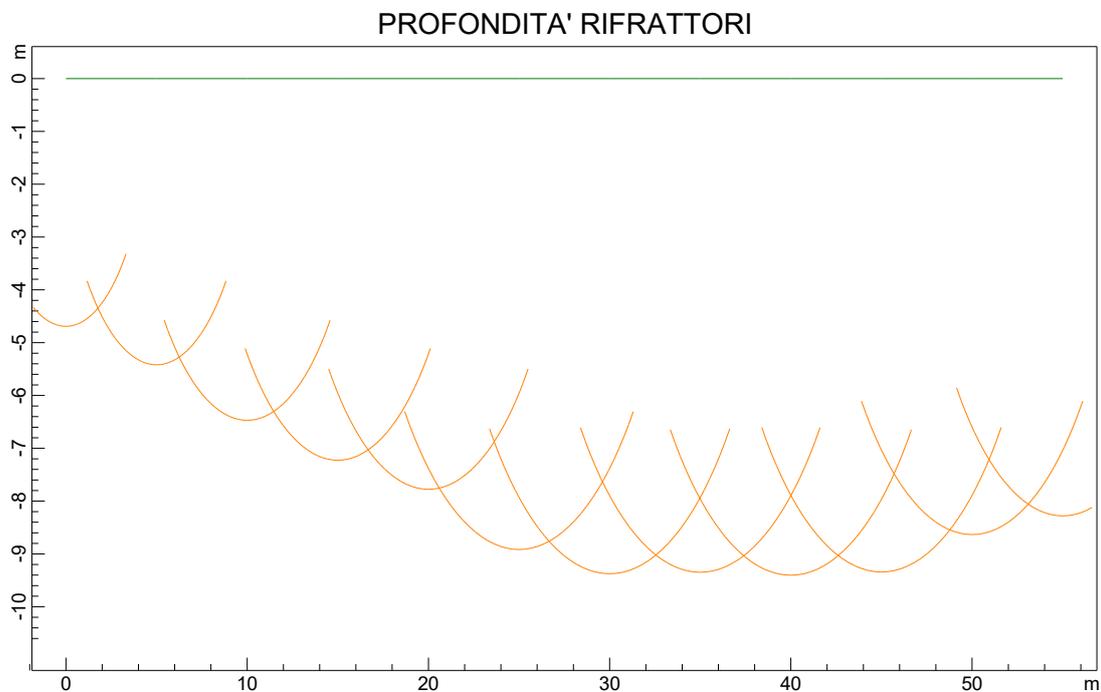


Fig.5.24 – Profondità livello

5.9 Osservazioni conclusive sulle indagini geofisiche

Scopo della campagna di indagine Geofisica era la determinazione dell'andamento continuo del contatto litostratigrafico superficiale, in particolare determinando la potenza dell'Unità Geotecnica che raggiunge il piano di campagna e che dimostra caratteristiche meccaniche non particolarmente eccellenti.

I risultati hanno evidenziato una notevole congruenza con le ipotesi formulate dal Prof. Marco Barla in fase di CTU e ampiamente confermate dalle indagini geognostiche a carotaggio continuo eseguite in fasi temporali successive.

Le caratteristiche, in termini di velocità di propagazione delle Onde P dell'orizzonte superficiale appaiono costanti su tutto il versante, con una velocità media di 389,4 m/s ed una deviazione standard delle velocità misurate in corrispondenza dei 26 stendimenti sismici di 41,5 m/s, pari al 10,6% del valore medio.

L'orizzonte sottostante presenta velocità di trasmissione delle Onde P marcatamente più elevate nella sezione di valle del versante, con una velocità media di 1574,5 m/s, ed una variabilità più ampia evidenziata da una deviazione standard di 401,3 m/s pari al 25,5% del valore medio.

Su questa variabilità influiscono gli stendimenti K e G (stendimenti più a valle), con valori di velocità del secondo orizzonte di 2440 m/s e 2301 m/s rispettivamente, entrambi collocati nella sezione di valle del versante che rilevano uno strato diverso, negli altri casi dove le velocità sono prossime a 1500 si potrebbe aver rilevato un cambio di strato oppure aver identificato la presenza di falda o entrambi

Per quanto riguarda gli aspetti geometrici, la potenza dello strato superficiale si presenta ridotta nella porzione settentrionale del pendio, circa 5-6 m in quell'area, mentre sale di tre metri, fino a valori di circa 8-9 m, nella sezione di monte del tratto di versante meridionale, fenomeno che ipoteticamente potrebbe essere dovuto ad un significativo intervento antropico volto ad aumentare la fruibilità dell'area meridionale della proprietà, sia in un'ottica di incremento della superficie edificabile, sia dal punto di vista dell'accessibilità dell'area verde.

Le tre immagini riportate nel seguito mostrano il posizionamento ed i risultati delle interpretazioni con prospettive viste da Nord-Ovest e Sud-Ovest.

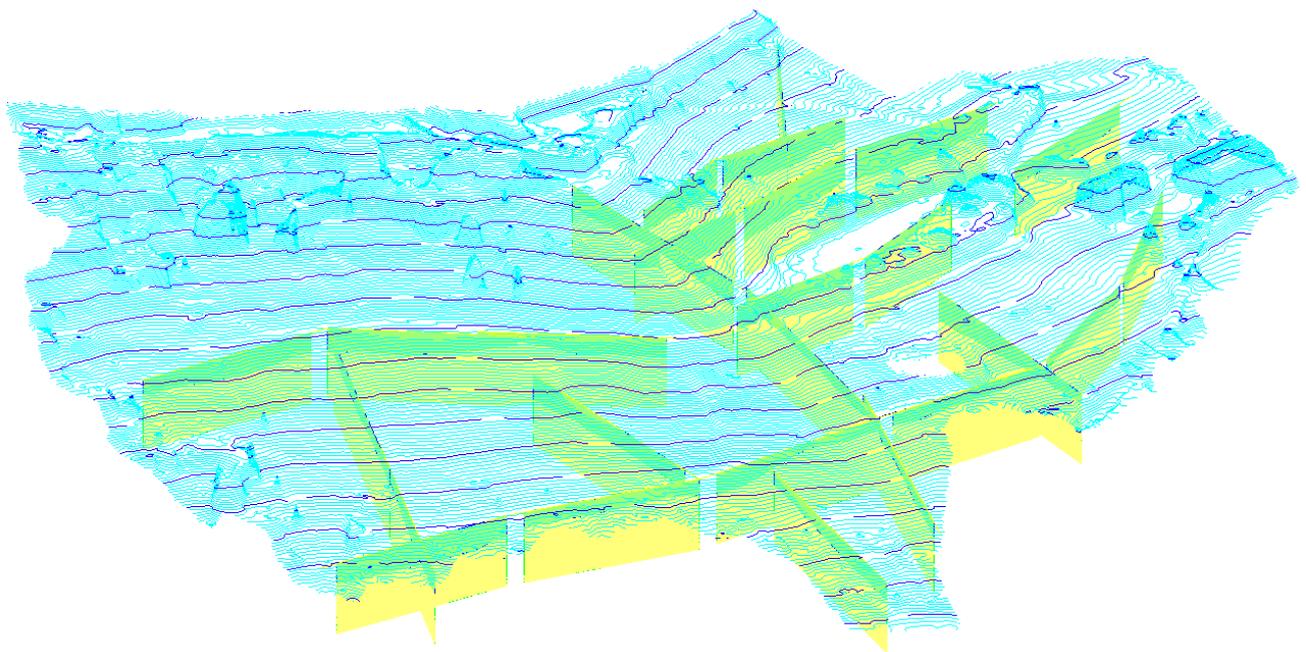


Fig.5.25 Profondità livelli complessivi vista da Nord-Ovest

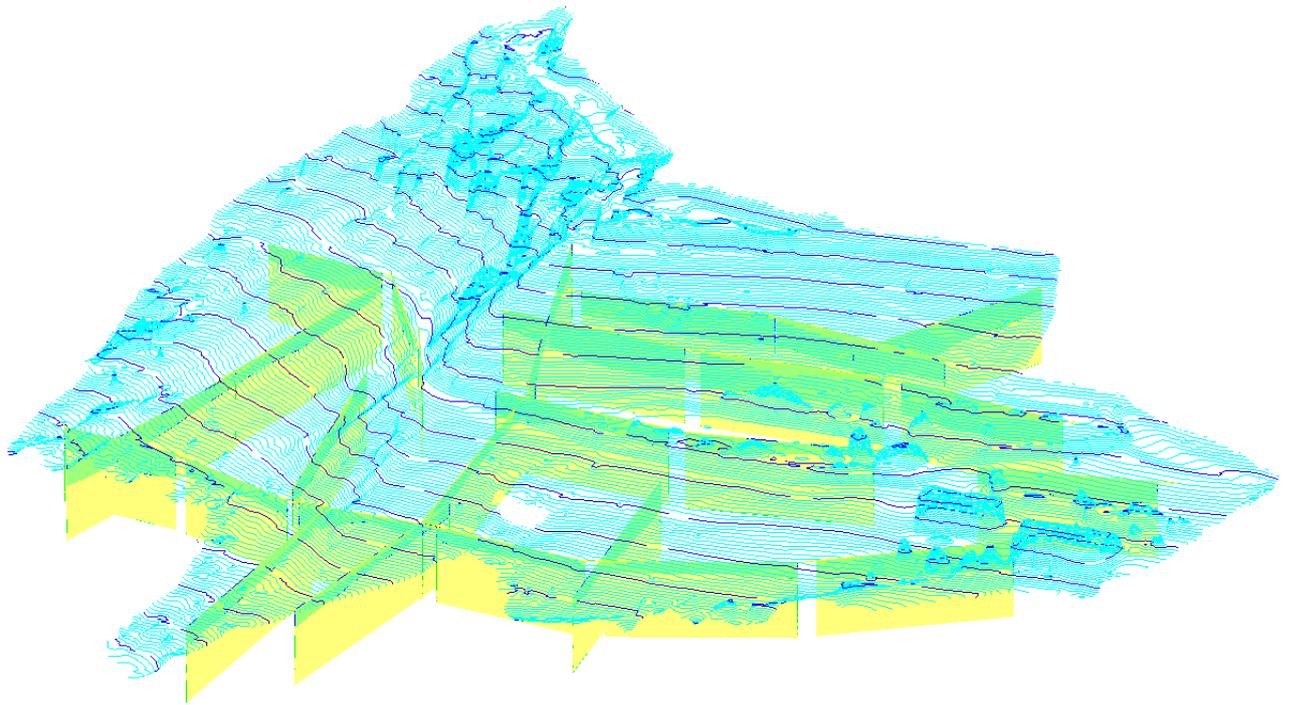
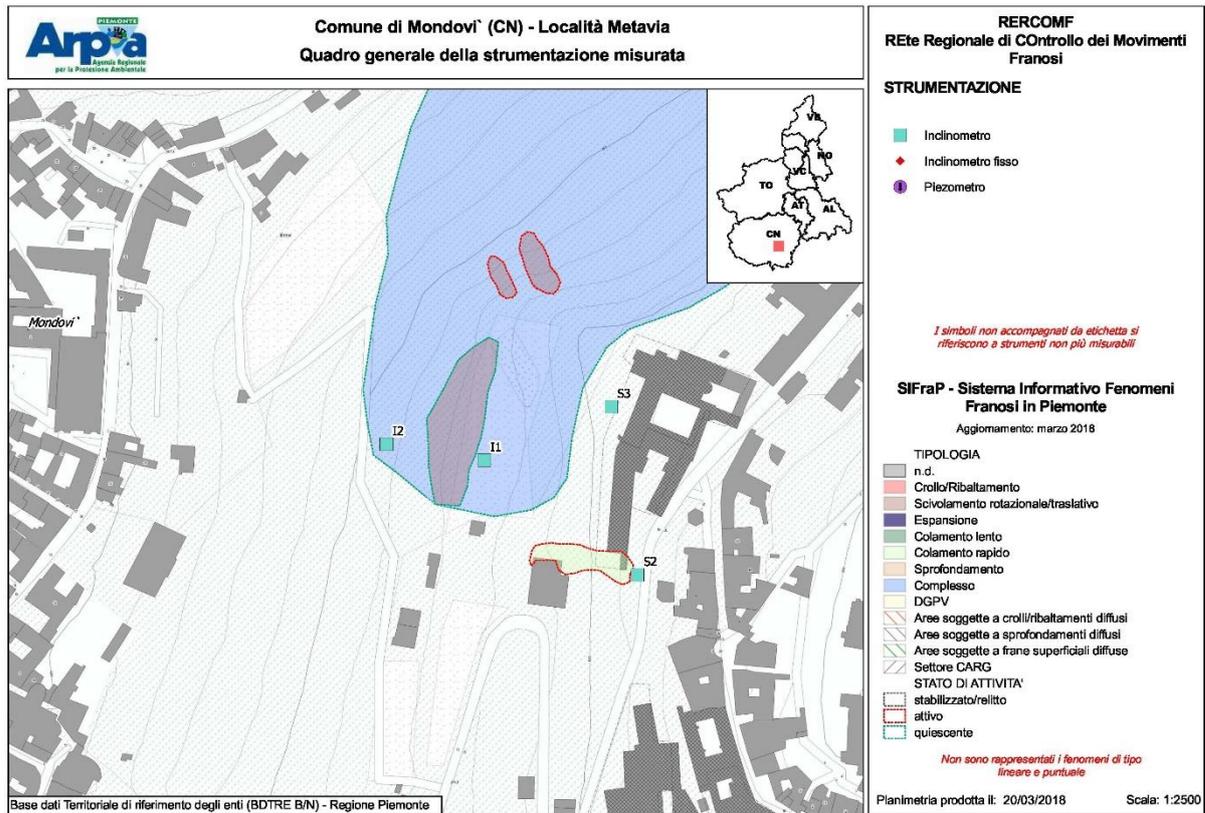


Fig.5.26 Profondità livelli complessivi vista da Sud-Ovest

5.10 Letture InclinoMetriche



Scheda Riassuntiva delle Misure e Stato della Strumentazione

Comune: MONDOVI (CN)
 Località: Piazza-Metavia
 Operatori: Mazzoli
 Sonda impiegata: ARPA1 - Data Taratura: 16/08/2018
 Data delle Misure: 04/10/2018

Tipo strumento	Nome	Codice	profondità originaria (m)	profondità misurata (m)	livello H2O da piano campagna (m)	diametro interno (mm)	materiale	automatizzato	tipo terminale protettivo	stato terminale protettivo	lucchetto	profondità della eventuale deformazione (m)	annotazioni
tubo inclinometrico	I1	I4MDVB1	23.0	23.0	/	76	Alluminio		elevazione metallo	buono	si		
tubo inclinometrico	I2	I4MDVB2	25.0	25.0	/	76	Alluminio		tombino metallo	buono	no		
tubo inclinometrico	S2	I4MDVB3	15.0	15.0	/	76	Alluminio		doppio stradale	buono	si		
tubo inclinometrico	S3	I4MDVB4	15.0	15.0	/	76	Alluminio		doppio stradale	buono	si		

Fig.5.27 – Scheda Arpa Movimenti franosi

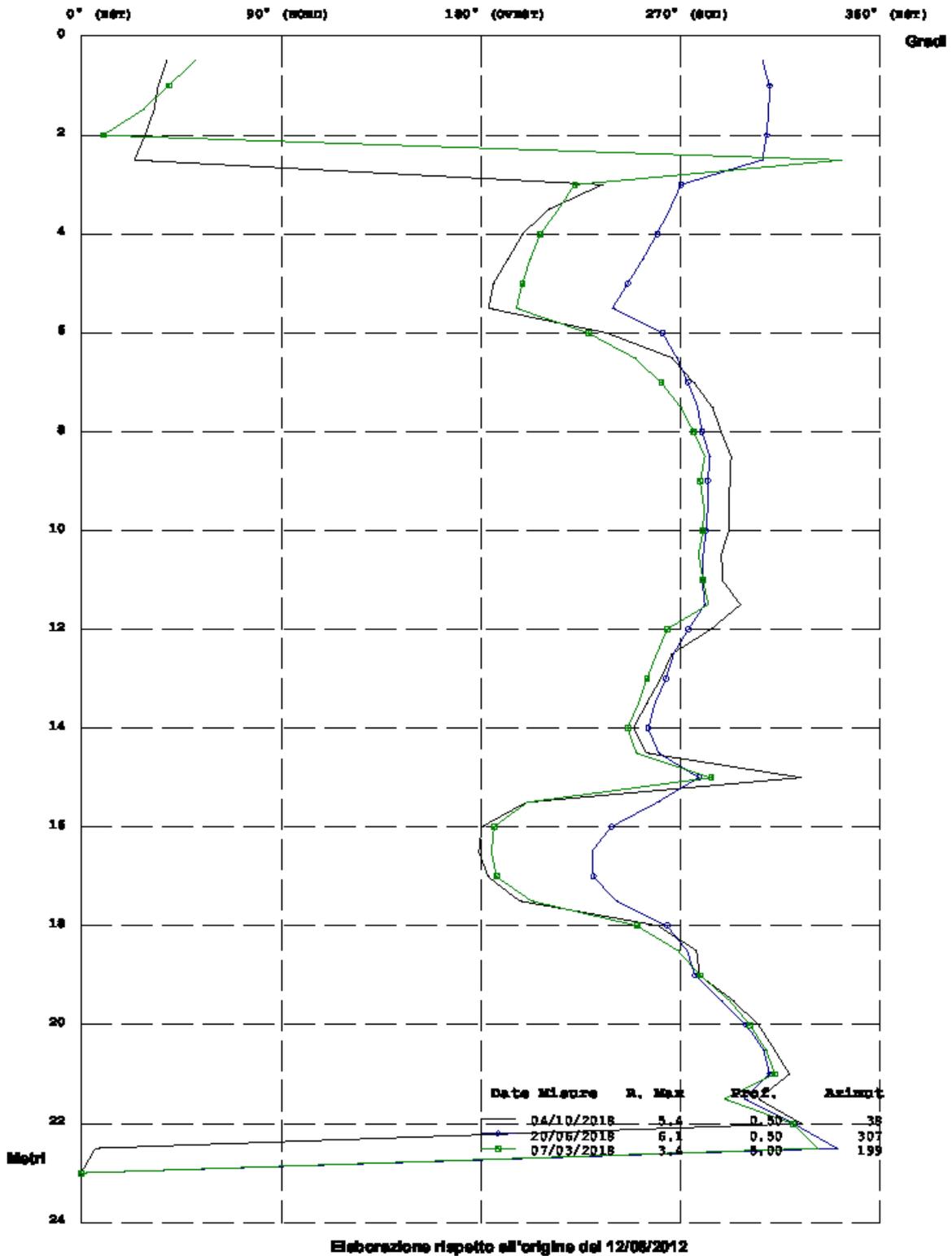
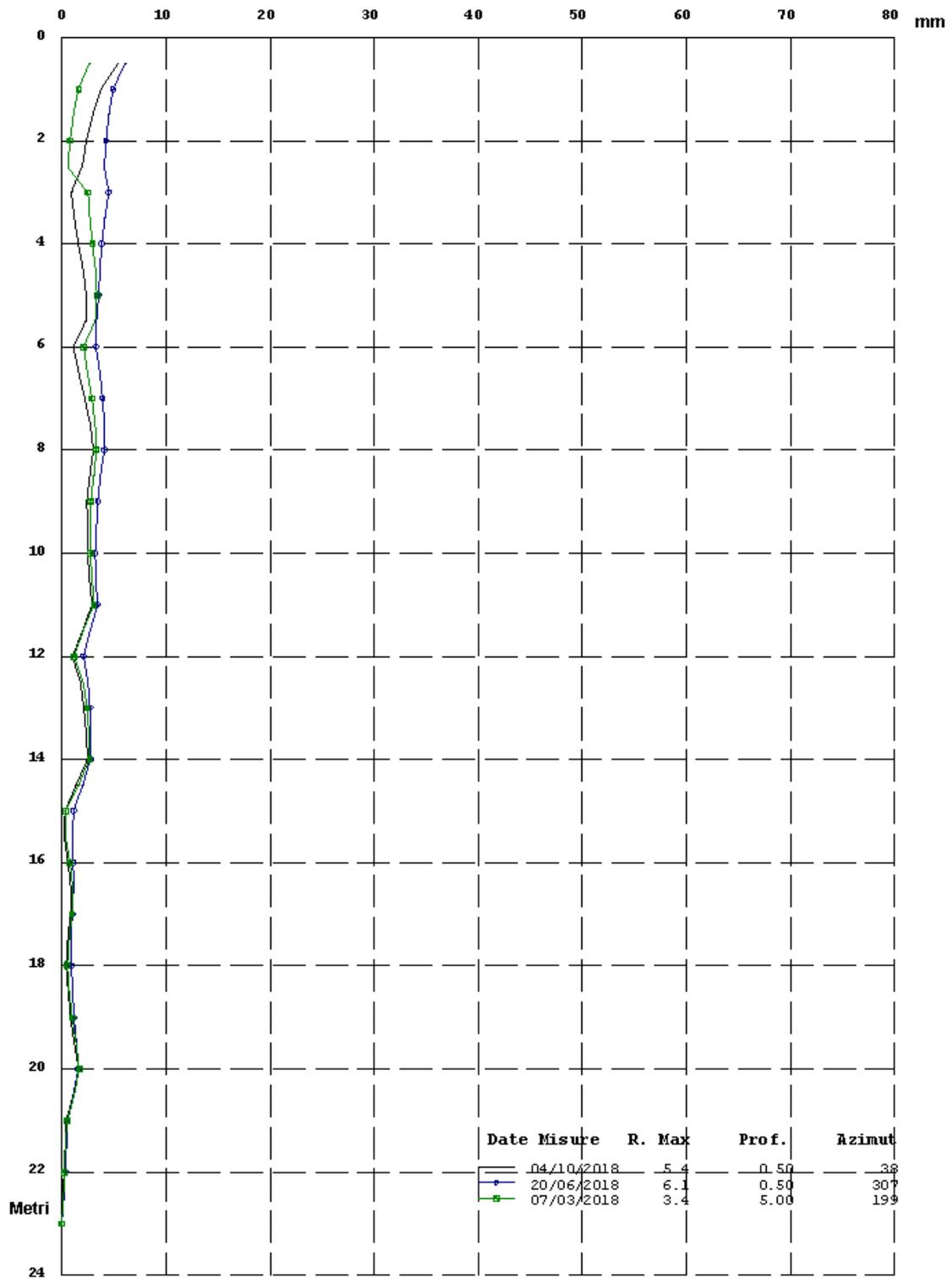


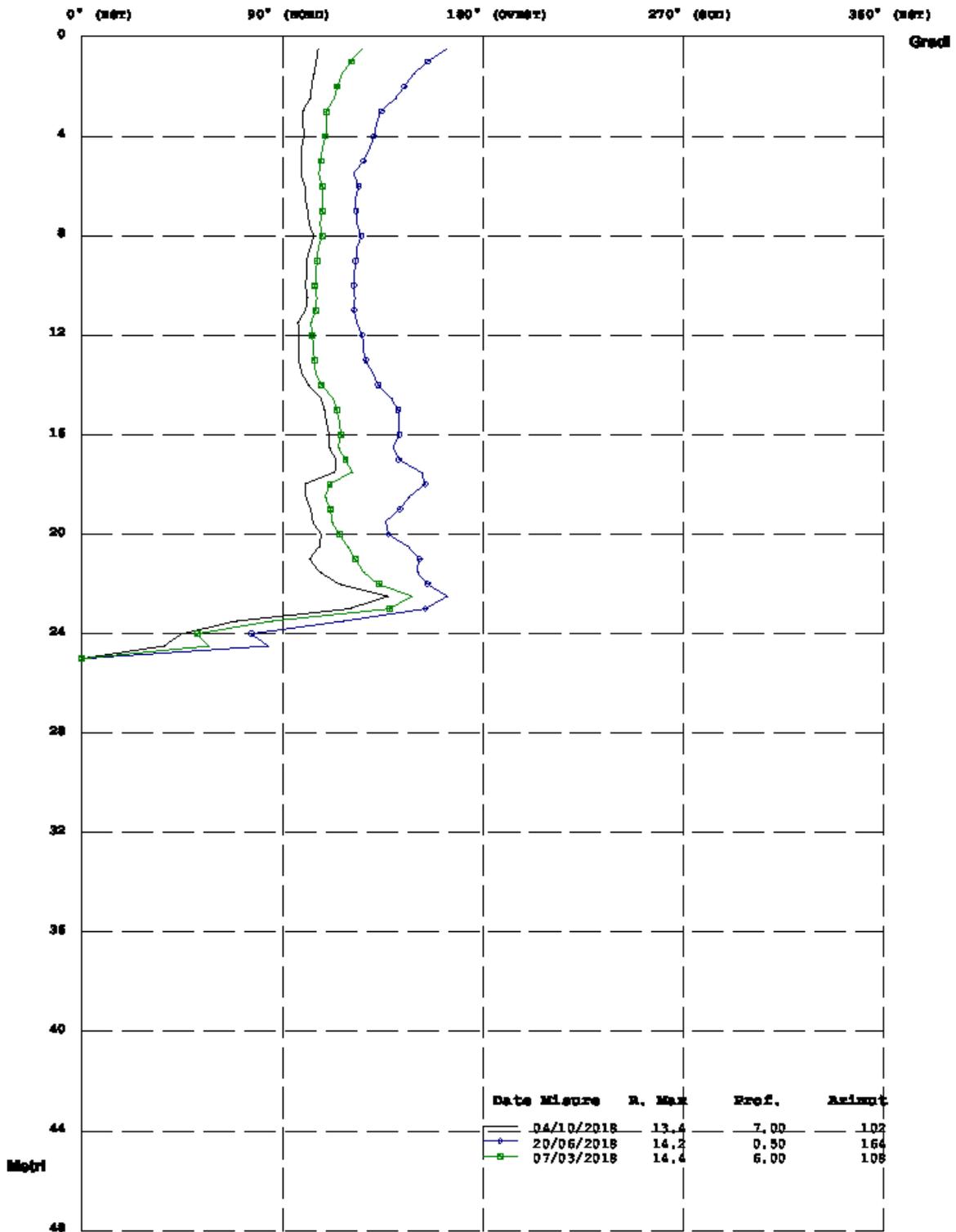
Fig.5.28 – Inclinometro I1 – Direzione spostamenti

Zona : MONDOVI (CN) Piazza Metavia Tubo: I1 Id: OI4MDVB1



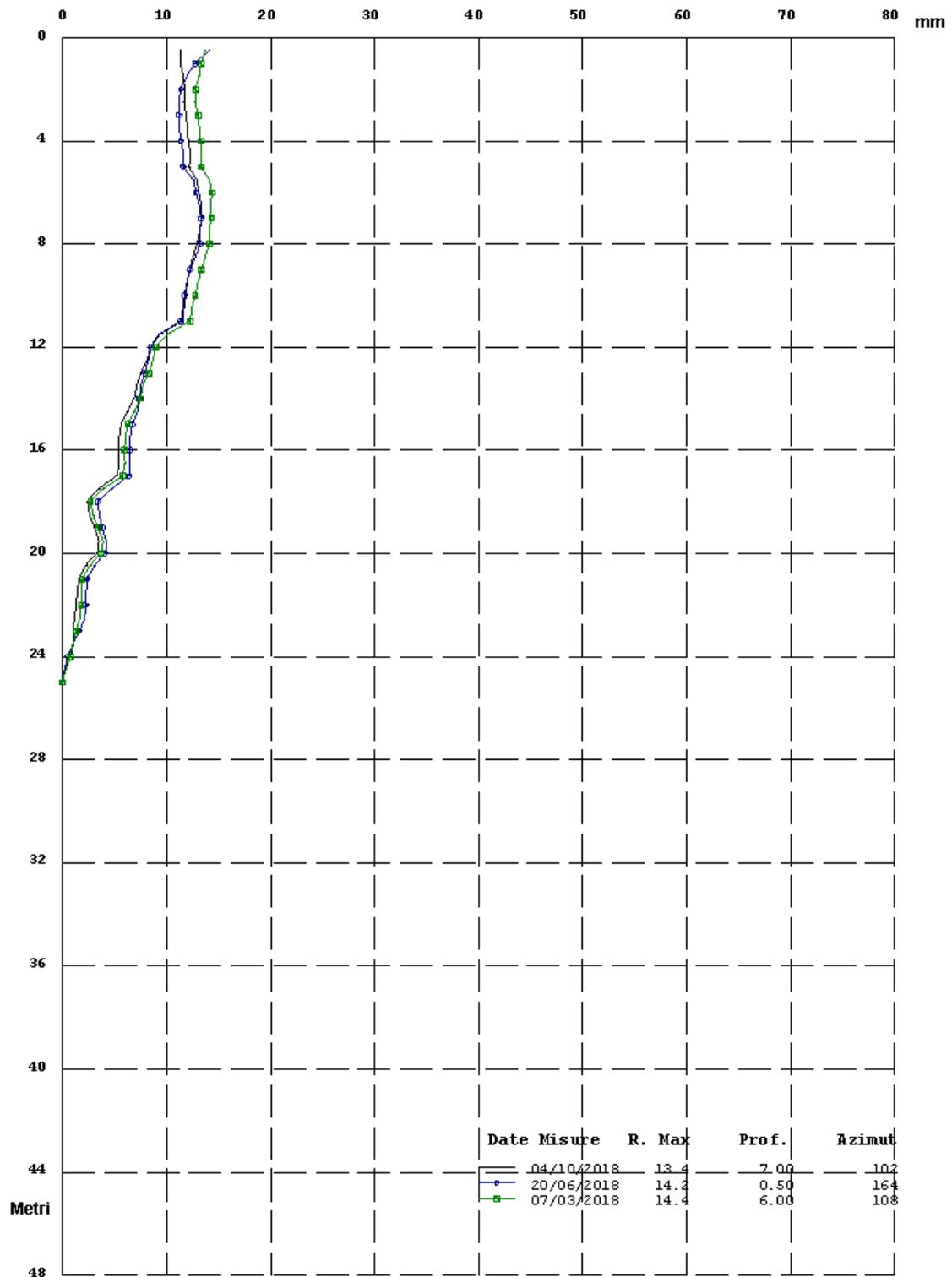
Elaborazione rispetto all'origine del 12/06/2012

Fig.5.29 – Inclinometro I1 – Spostamenti



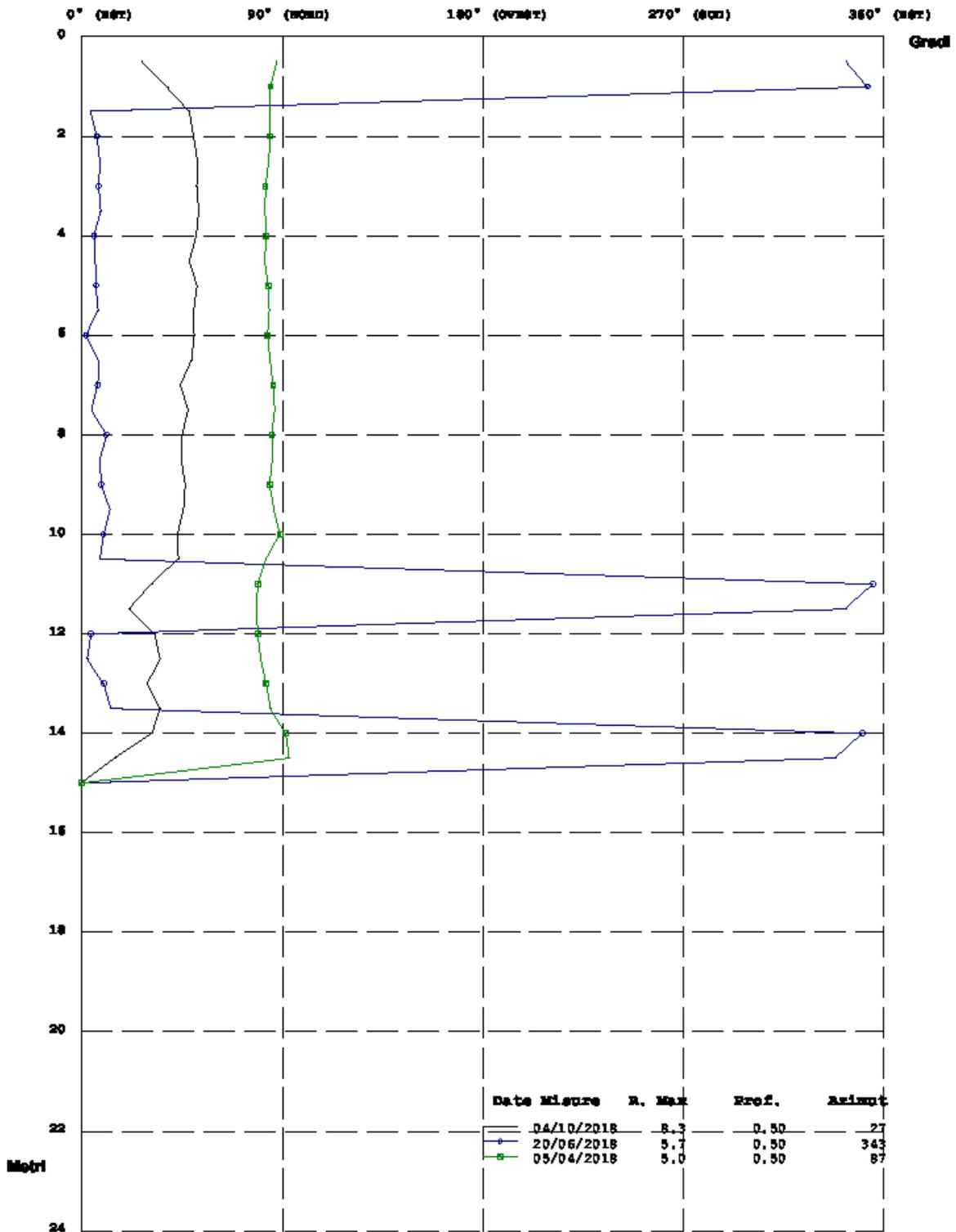
Elaborazione rispetto all'origine del 12/06/2012

Fig.5.30 – Inclinometro I2 – Direzione spostamenti



Elaborazione rispetto all'origine del 12/06/2012

Fig.5.31 – Inclinometro I2 – Spostamenti



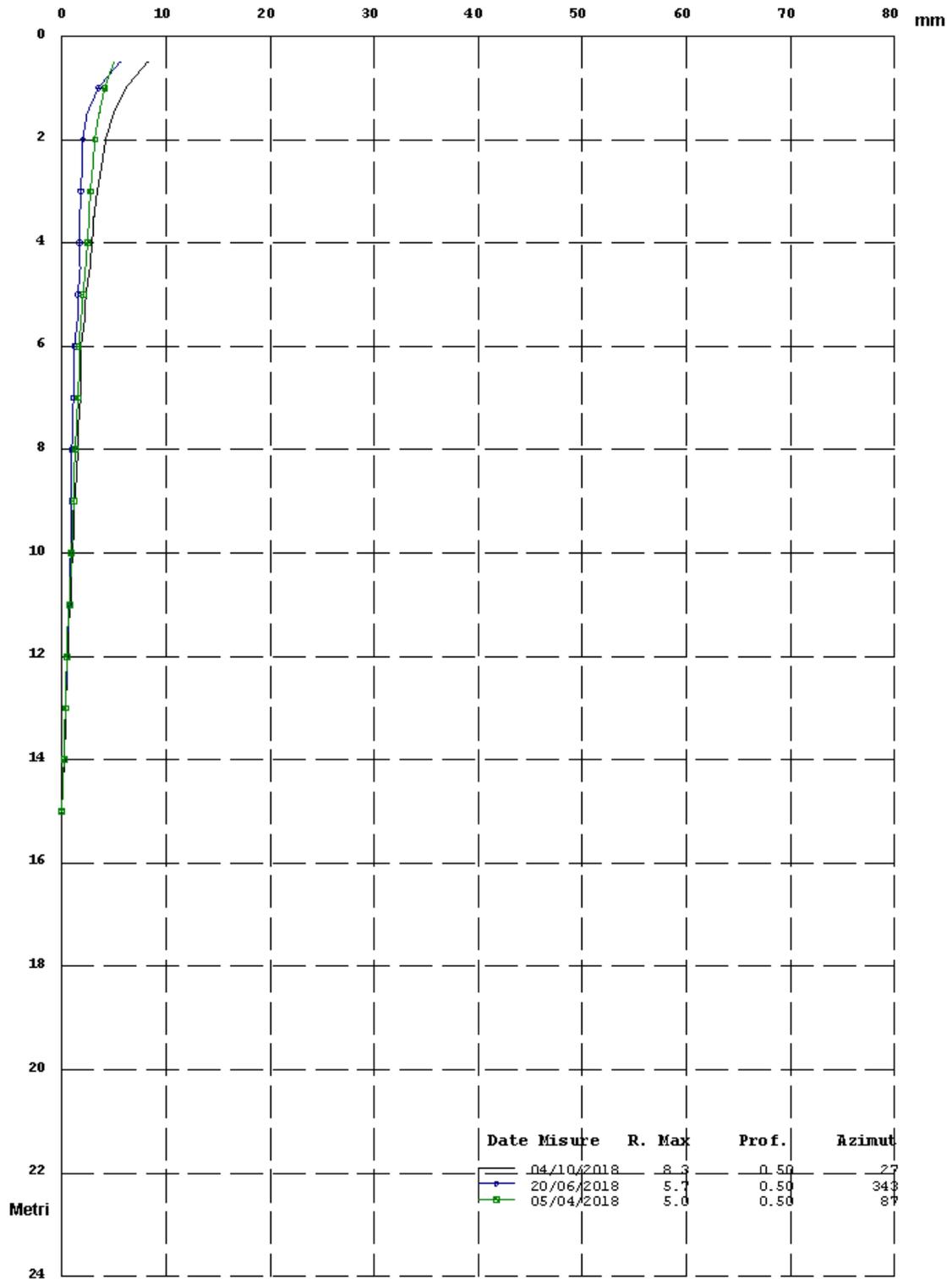
Elaborazione rispetto all'origine del 07/03/2018

Fig.5.32 – Inclinometro S2 – Direzione spostamenti

Zona : MONDOVI (CN) Metavia

Tubo: S2

Id: OI4MDVB3



Elaborazione rispetto all'origine del 07/03/2018

Fig.5.33 – Inclinometro S2 – Spostamenti

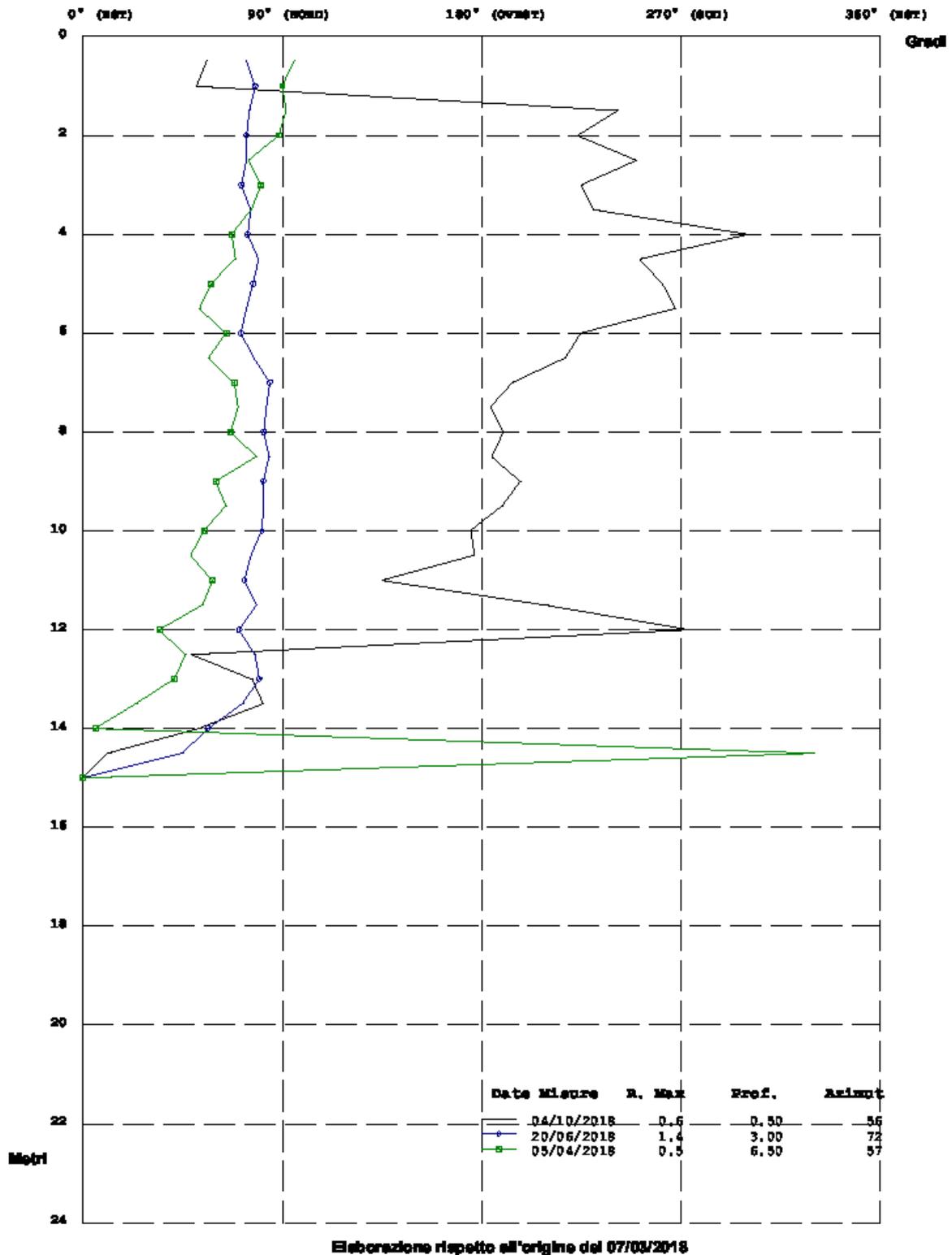
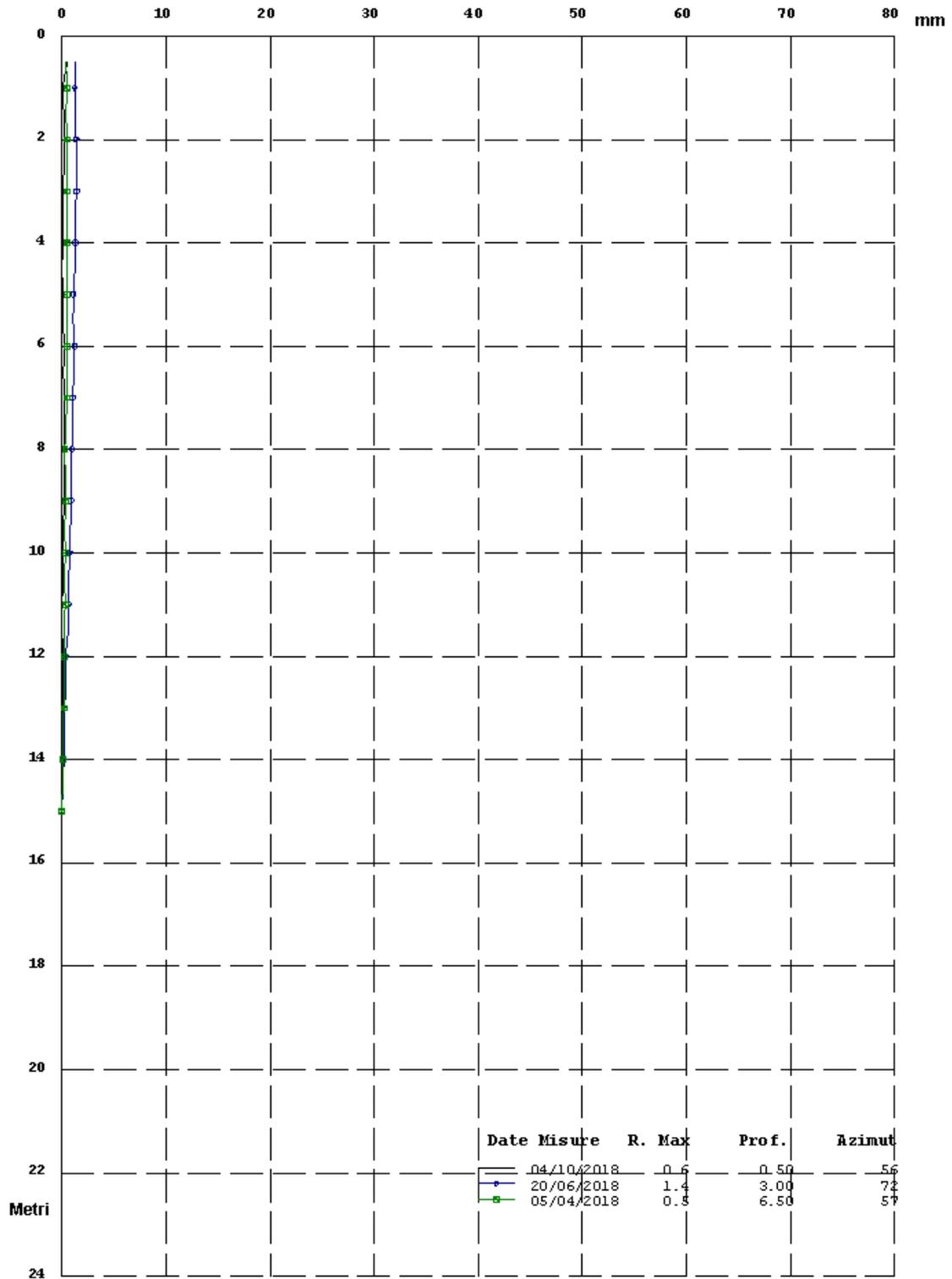


Fig.5.34 – Inclinometro S3 – Direzione spostamenti

Zona : MONDOVI (CN) Metavia

Tubo: S3

Id: OI4MDVB4



Elaborazione rispetto all'origine del 07/03/2018

Fig.5.35 – Inclinometro S3 – Spostamenti

5.10.1 Considerazioni

Dai dati relativi alle letture inclinometriche si può notare che:

- lo spostamento rilevato sull'inclinometro S3 posto sulla parte a monte del rilevato in corrispondenza del piazzale al di sotto dell'Istituto Comprensivo Giolitti Belisario, risulta pari a 1-2 millimetri, che può rientrare nell'errore strumentale;
- lo spostamento rilevato sull'inclinometro S2 posto sulla parte a monte del rilevato in corrispondenza del punto dove è avvenuta la frana, risulta avere uno spostamento dell'ordine di misura del centimetro sulla parte sommitale dei primi 8-10 m dovuto a probabili assestamenti del terreno a seguito dell'evento franoso;
- per quanto riguarda infine gli inclinometri I1 e I2, posti sul pianoro a metà versante in corrispondenza del vecchio campo da calcio, gli spostamenti sono più consistenti e a profondità maggiori. Si individuano almeno due possibili superfici di scivolamento, rispettivamente a 12 m ed a 20 m.

6 L'evento franoso del 2017

6.1 Descrizione dell'evento

In questo capitolo si fornisce una ricostruzione della cronologia degli eventi accaduti i giorni 29 e 30 Dicembre 2017 basata sull'analisi della documentazione di ATP redatta dal Dott. Prof. Marco Barla.

Dalle testimonianze dirette della Dott.ssa Garello, dirigente scolastico dell'Istituto che quella mattina si trovava nell'edificio scolastico, la frana si sarebbe attivata poco dopo le ore 10:00 del 29/12/2017 ed è stata accompagnata da un "forte boato" al seguito del quale è stato avvertito un forte odore di gas metano nell'aria. La stessa Garello provvede ad avvertire la Polizia Locale ed i Vigili del Fuoco che ricevono le richieste di intervento rispettivamente alle 10:10 ed alle ore 10:19. La testimonianza diretta della Dirigente Scolastica, unitamente a quanto riportato nella relazione dalla comandante della Polizia Locale Domenica Chionetti e dalla relazione di intervento dei Vigili del Fuoco consentono quindi di individuare con sufficiente precisione l'istante di innesco della frana. Anche nei documenti redatti da ARPA Piemonte (in particolare la scheda SIFRAP codice 0046081200) viene indicata l'attivazione del fenomeno franoso tra le 10:00 e le 10:30 del 29/12/2017.

Da quanto è stato possibile ricostruire, in pochi secondi la massa di terreno è scivolata a valle acquisendo una notevole velocità ed ha impattato, arrestandosi pressoché istantaneamente, contro il muro di monte della Palestra di Metavia.

La notevole velocità che ha acquisito la massa franata è testimoniata da alcuni alberi dialto fusto traslati a valle e spezzati dall'impatto all'altezza del bordo del tetto della Palestra di Metavia

A seguito dell'attivazione, le dimensioni in pianta approssimative del dissesto ricostruite sulla base del rilievo topografico effettuato dall'Ing. Geo. Massobrio erano pari a circa 45 m di lunghezza e 20 m di larghezza nella zona adiacente all'ala S dell'Istituto Alberghiero. In questa prima fase la torretta che ospitava la cabina di trasformazione elettrica a servizio della scuola e la scala esterna di sicurezza collegata strutturalmente alla prima ed appoggiata alla facciata S dell'Istituto Alberghiero sono rimaste in piedi, anche se parzialmente lesionate e con le fondazioni esposte e aggettanti sull'area franata, come mostrano le prime foto di dettaglio dell'area.

Sul ciglio del piazzale era inoltre presente una cabina ospitante un gruppo di riduzione finale del metano poggiante su un basamento in calcestruzzo di dimensioni approssimative 3.0 x 2.0 m che con il dissesto viene completamente asportata e distrutta, unitamente ai relativi tubi di alimentazione. Fin da subito ai Vigili del Fuoco ed alla Polizia Locale si evidenzia quindi una situazione di elevata pericolosità poiché il gas in pressione dalle tubature si stava disperdendo nell'aria con pericolo di esplosione.

Poco prima delle 11:00 giungono sul posto i tecnici Italgas chiamati direttamente dai Vigili del Fuoco per chiudere a monte e a valle le valvole ed interrompere così il flusso di gas ai tubi tranciati dalla frana. Alle ore 11:00 circa nella relazione di Italgas è indicato che l'area è messa in sicurezza e che il flusso di gas dalle tubazioni è interrotto.

Il coronamento della frana era di forma arcuata e si sviluppava per circa 12-13 m sul piazzale in adiacenza del cancello di ingresso del cortile dell'istituto scolastico. Successivamente al crollo della torretta, il coronamento si è ampliato fino a raggiungere i 18 metri.

La nicchia di distacco fin da subito era caratterizzata da un'estrema verticalizzazione risultante in una scarpata di altezza complessiva compresa tra 4 e 5 m con il tappeto di asfalto del

piazzale localmente aggettante su questa. La nicchia di distacco e le spalle della frana mettono a giorno i notevoli spessori di materiale di riporto e riempimento estremamente eterogenei (pietre, ciottoli, frammenti di mattoni e cemento armato, macerie varie in abbondante matrice sabbioso-limosa) caratterizzati in maniera discontinua da una stratificazione sub-parallela al versante; all'interno di questi riporti, oltre i differenti sottoservizi danneggiati dalla frana (tubazioni del gas e cavidotti vari) sono ben visibili anche porzioni di strutture murarie in laterizio sepolte.

Queste strutture sarebbero da ricondurre ai contrafforti di scatolari in laterizio (conosciuti anche con il nome di "bastioni") che sono stati riempiti di materiale di riporto in epoca storica al fine di estendere lo spazio edificabile della collina di Mondovì Piazza verso valle.

6.2 Condizioni topografiche e morfologiche antecedenti la frana

La documentazione storica disponibile insiste prevalentemente, come ovvio, sulle strutture degli edifici, mentre non sono facilmente reperibili informazioni specificatamente topografiche.

Per completezza di informazione si riporta un'immagine fotografica del vano scale poco dopo il cedimento geotecnico del versante e poco prima del collasso definitivo della struttura.



Fig.6.1– Evento franoso

6.3 Ipotesi sulle cause di innesco

Sempre secondo la citata Fonte, la frana è riconducibile ad un colamento rapido che ha coinvolto principalmente i materiali di copertura, essenzialmente materiali di riporto depositati negli anni passati sul versante originario al fine di creare l'accesso carraio all'Istituto Alberghiero.

Il movimento, in particolare, ha avuto una sola accennata dinamica di innesco per scivolamento rotazionale, dovuto, probabilmente, ad un'eccessiva saturazione dei materiali sciolti di copertura.

Al momento, non è certa la causa dell'imbibizione anomala e concentrata dei terreni superficiali, ma pare altamente probabile che sia conseguente alla rottura della condotta idrica corrente lungo la Via E. Tortora gestita dalla Soc. Mondo Acqua S.p.a.

A prescindere quindi dalle cause antropiche o naturali, appare evidente e più volte confermato nella Relazione del Consulente del Magistrato che l'innalzamento della falda abbia giocato un ruolo fondamentale nell'innescare del fenomeno franoso.

Nelle immagini successive sono riportate alcune foto scattate poco dopo l'evento franoso.



Fig.6.2– Evento franoso



Fig.6.3– Evento franoso

6.4 Caratterizzazione meccanica degli strati nell'area di frana

Dal momento che in corso d'opera, per soddisfare alcune richieste della Committenza relative all'accessibilità del sito, nell'ottica del successivo completamento delle opere atte a garantire la riqualificazione e la fruibilità dell'area, sono state effettuate alcune varianti al progetto originale, in particolare allungando verso monte il rilevato in terra rinforzata, in questo capitolo si valuteranno le condizioni di stabilità alla luce della geometria finale e della caratterizzazione geologica e geotecnica così come fornita in un documento ad uso interno dal Geologo incaricato Dott. Giuseppe Galliano, alla luce delle risultanze nelle nuove indagini geognostiche eseguite nel contempo.

A tal proposito si riporta integralmente, nelle immagini seguenti, la documentazione fornita.

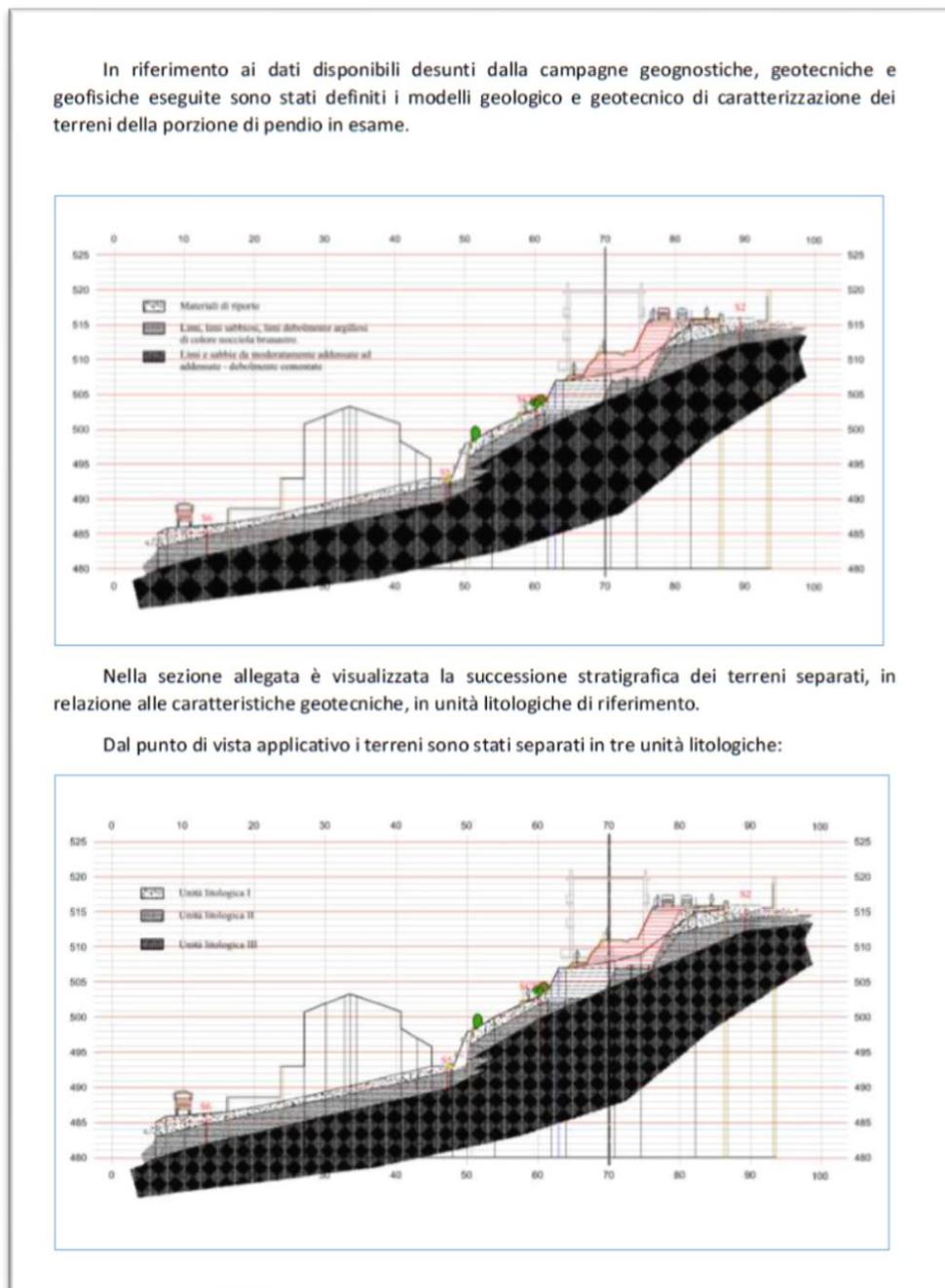


Fig.6.4 – Caratterizzazione geotecnica

UNITA' 1: costituita essenzialmente da terreni di riporto misti eterogenei e parte dalle coltri detritiche e colluviali. Si tratta di materiali da sciolti a privi di consistenza, caratterizzati da un fuso granulometrico piuttosto ampio, dove è presente una matrice di tipo limoso-sabbiosa – deb. argillosa con ghiaie, ciottoli e blocchi e frammenti di laterizi vari, macerie. La potenza di questa unità, facendo riferimento allo stato di fatto, in relazione ai risultati delle indagini disponibili varia da submetrica a poco più (da 1.00 – 2.00 m) a partire dalla nicchia principale, con lo spessore minimo, e lo spessore massimo a ridosso del muro di contenimento esistente a tergo della palestra di Metavia.

Tali materiali sono visibili anche in corrispondenza della nicchia di distacco dove raggiungono la potenza minima indicata interposti a strutture in muratura.

Parametri geotecnici

C	0 [kPa]
ϕ'	29 [°]
ϕ_r	26 [°]
γ	19 [kN/m ³]

UNITA' 2: comprende limi, limi sabbiosi poco addensati passanti a sabbie fini e medio fini moderatamente addensate (riferibili ai depositi pliocenici del sondaggio S2 porzione superiore delle sabbie di Asti) di colore giallastro rossiccio.

C	0 [kPa]
ϕ'	33 [°]
ϕ_r	30 [°]
γ	20 [kN/m ³]

UNITA' 3: comprende limi e sabbie da moderatamente addensate a addensate, debolmente cementate, con passate microconglomeratiche e livelli arenacie (riferibili ai depositi pliocenici del sondaggio S2 porzione superiore delle sabbie di Asti) di colore giallastro rossiccio.

Fig.6.5 – Caratterizzazione geotecnica

C'	6,9 – 8.6 [kPa]
ϕ'	27 - 29 [°]
ϕ' da spt	36 – 40 [°]
γ	21 [kN/m ³]

Fig.6.6 – Caratterizzazione geotecnica

6.5 Caratterizzazione geotecnica

Nell'immagine sottostante è riportata in maggior dettaglio la sezione redatta recentemente dal Geologo, in cui compaiono le opere effettivamente realizzate nonché quelle preliminarmente ipotizzate per il futuro completamento dell'intervento.

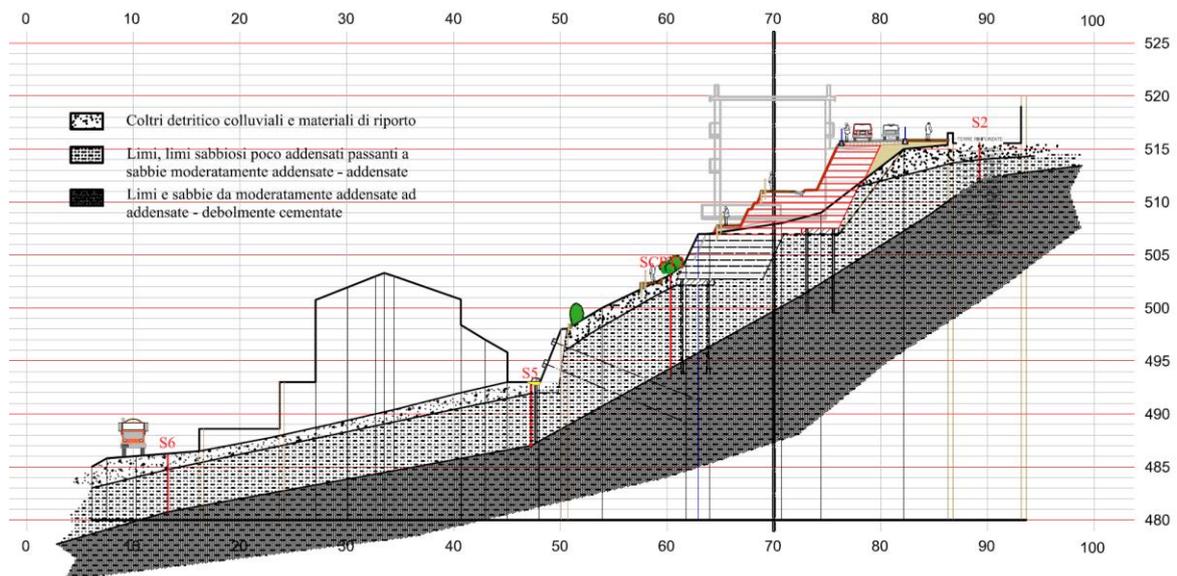


Fig.6.7- Sezione geotecnica di studio

Da valle verso monte compaiono nell'ordine la sagoma della Palestra Metavia (ex Casa del Balilla), il coevo muro a gravità, cui nell'immagine sono stati già applicati i tiranti e la sottofondazione che attualmente sono solo un'ipotesi operativa, la scarpata risagomata e rivestita con biostuoia, il rilevato in terra rinforzata già eseguito, con la relativa fondazione costituita da una soletta in calcestruzzo su micropali, rappresentato in nero, e l'ipotizzato ampliamento costituito da un ulteriore rilevato, anch'esso sottofondato su una soletta in micropali, rappresentato in colore rosso.

Le tre unità litostratigrafiche, procedendo dall'alto verso il basso, sono così state descritte dal Geologo:

UNITÀ 1: *costituita essenzialmente da terreni di riporto misti eterogenei e parte dalle coltri detritiche e colluviali. Si tratta di materiali da sciolti a privi di consistenza, caratterizzati da un fuso granulometrico piuttosto ampio, dove è presente una matrice di tipo limoso-sabbiosa - deb. argillosa con ghiaie, ciottoli e blocchi e frammenti di laterizi vari, macerie. La potenza di questa unità, facendo riferimento allo stato di fatto, in relazione ai risultati delle indagini disponibili varia da submetrica a poco più (da 1.00 - 2.00 m) a partire dalla nicchia principale, con lo spessore minimo, e lo spessore massimo a ridosso del muro di contenimento esistente a tergo della palestra. Tali materiali sono visibili anche in corrispondenza della nicchia di distacco dove raggiungono la potenza minima indicata interposti a strutture in muratura.*

Parametri geotecnici:

C	0 [kPa]
φ'	29 [°]
φ_r	26 [°]
γ	19 [kN/m ³]

UNITÀ 2: comprende limi, limi sabbiosi poco addensati passanti a sabbie fini e medio fini moderatamente addensate (riferibili ai depositi pliocenici del sondaggio S2 porzione superiore delle sabbie di Asti) di colore giallastro rossiccio.

C 0 [kPa]
 φ' 33 [°]
 φ_r 30 [°]
 γ 20 [kN/m³]

UNITÀ 3: comprende limi e sabbie da moderatamente addensate a addensate, debolmente cementate, con passate microconglomeratiche e livelli arenacei (riferibili ai depositi pliocenici del sondaggio S2 porzione superiore delle sabbie di Asti) di colore giallastro rossiccio.

C' 6.9 – 8.6 [kPa]
 φ' 27 - 29 [°]
 φ' da spt 36 – 40 [°]
 γ 21 [kN/m³]

Il Geologo non ha descritto nel documento interno precedentemente riportato la metodologia di calcolo dell'angolo di attrito dell'UNITÀ 3 in base ai valori di nSPT, tuttavia è facile intuire che abbia utilizzato una delle classiche tavole di curve caratteristiche come quella di De Mello (1971) sotto riportata, che per il valore di nSPT = 24 rilevato a 9,0 m di profondità nel sondaggio S2 (figura a pagina successiva), quindi con una tensione verticale efficace di circa 160 kPa = 16 t/m² (unità utilizzata sull'asse delle ordinate del diagramma), fornisce l'indicazione di un angolo di attrito espresso come un range lasciato giustamente ampio, dal momento che è stato determinato in base ad un singolo valore di nSPT .

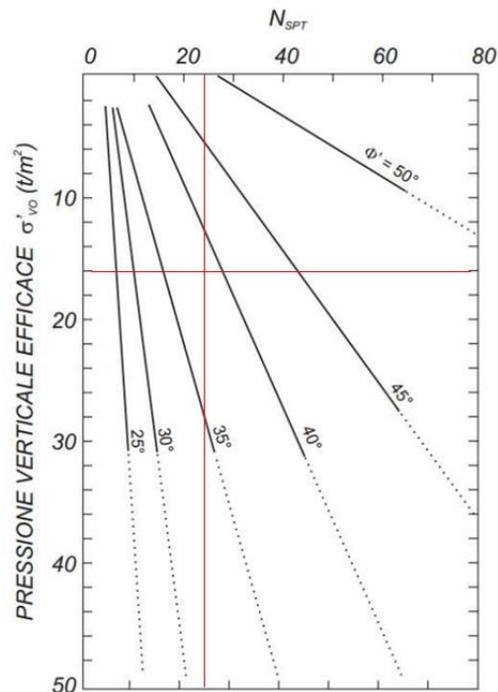


Fig.6.8 – Grafico per caratterizzazione geotecnica in funzione di prove SPT [8]

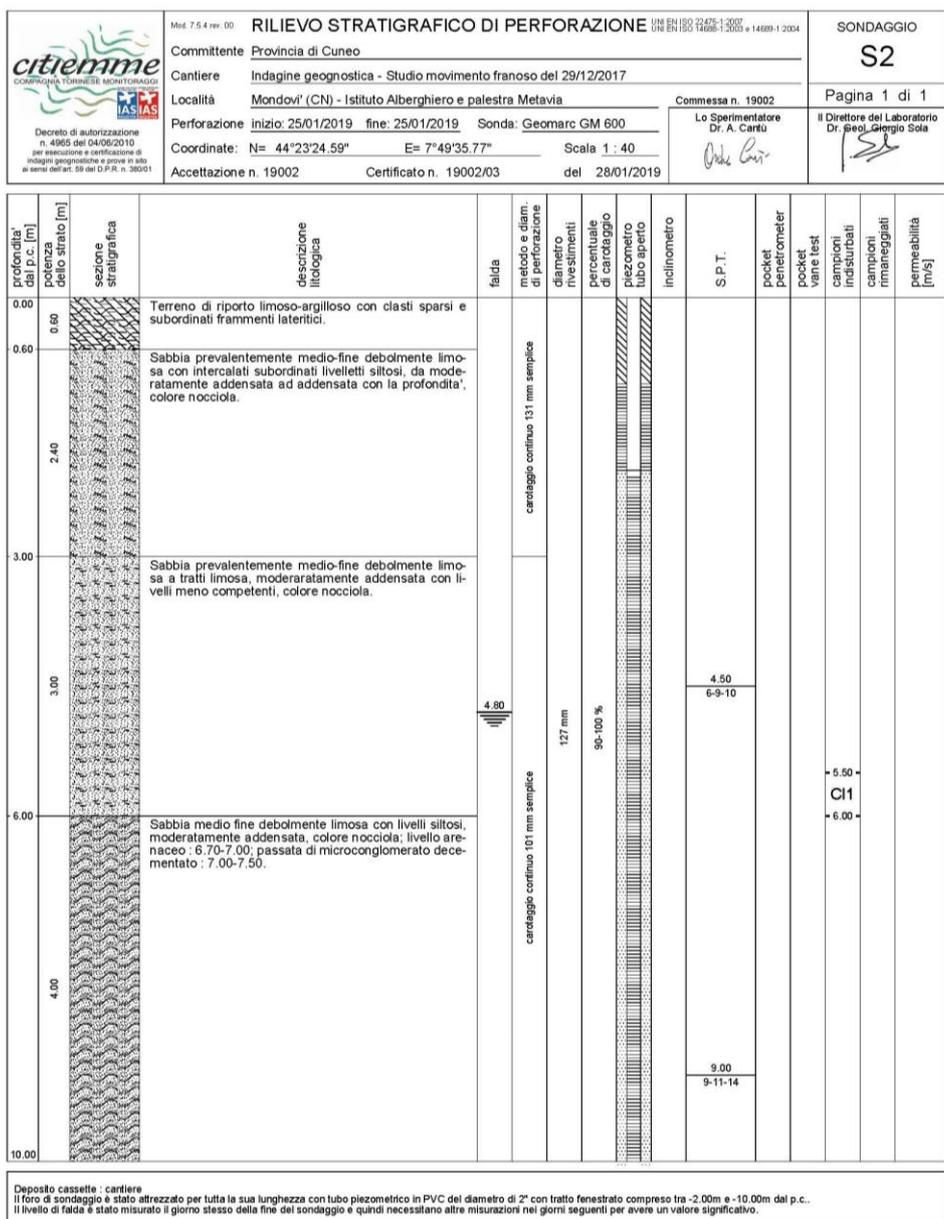


Fig.6.9 – Sondaggio S2

Questi parametri sono anche riportati nella Relazione del Prof. Marco Barla [7] dove vengono identificate le Unità Geotecniche: (unità 1-A, unità2-B, unità 3-C).

	Descrizione	γ_n [kN/m ³]	$\varphi'p$ [°]	c' [kPa]	Fonte
Unità A	Terreni di riporto	20.0	29.1	9.0	Caratterizzazione geotecnica 1988
Unità B	Limi sabbiosi debolmente argillosi	20.0	33.7	0.0	Caratterizzazione geotecnica 1988+ prove SPT
Unità C	Sabbie con limo	19.0	43.9	0.0	Prove di laboratorio + prove SPT
Unità D	Alternanze di limi, limi sabbiosi, limi argillosi, sabbie ed arenarie	20.0	26.0	20.0	Da letteratura (Massobrio 2018)

Tabella 6.1 - Caratterizzazione geotecnica

7 *Interventi di ripristino morfologia del versante*

In questo capitolo verrà analizzata il ripristino del versante distrutto dalla frana con la rimodellazione del versante con terre rinforzate.

La terra rinforzata è stata realizzata sovrapponendo 7 strati dello spessore di 0,60 m ciascuno, utilizzando casseri con angolo di 65°, e per il riempimento è stato utilizzato il materiale proveniente dall'Unità 2, che presenta un angolo di resistenza residua pari a 30°, scelta di calcolo cautelativa in quanto la rullatura del terreno ed il compattamento che ne deriva portano ad un incremento dell'angolo di resistenza al taglio di picco, che per le condizioni naturali è stato parametrizzato a 33°.

Per la verifica a posteriori è stato effettuato un primo test di calcolo per determinare i requisiti minimi per la stabilità del rilevato, utilizzando le geogriglie meno resistenti tra quelle prodotte dal Fornitore selezionato.

Nella figura 7.1 sono riportati i parametri assegnati alle terre rinforzate per l'esecuzione dei calcoli.

TERRE ARMATE	
Quota telo alla base [m]	0
Quota limite d'installazione teli [m]	4.1
Distanza minima teli [m]1
Distanza massima teli [m]6
Resistenza max a trazione [kN/m]	25
Fat. rid. danneggiamento meccanico [-]	1.2
Fattore riduzione durata [-]	1.2
Fattore rid. creep [-]	1.2
FS Tieback [-]	1.3
FS Compound [-]	1.3
Numero centri lungo il lato [-]	10
N. iterazioni calcolo automatico griglia [-]	10

Numero di iterazioni di calcolo da eseguire nella determinazione del posizionamento ottimale della maglia dei centri.

Fig.7.1 – parametrizzazione calcolo terre rinforzate

Il metodo di calcolo utilizzato è quello pubblicato da Dov Leshchinsky nell'articolo "*Stability of geosynthetic reinforced soil structures*" di cui si riporta qui il solo *abstract* in figura 7.2 [9].

ABSTRACT: A framework for stability analysis of reinforced soil structures is presented. It produces economical design of stable reinforced walls, slopes and embankments. Elements such as local, compound, global and direct sliding stabilities are ensured. This framework was implemented in program ReSlope. More complex and versatile stability analysis methods can use the presented framework as a generic template (e.g., program ReSSA uses it in an analysis-oriented fashion). Following the conceptual analyses is an instructive parametric study. General guidelines about the selection of long-term geosynthetic and soil strengths and a comparison with a case history are discussed. The meaning of "factor of safety" in the context of reinforced soil structures is investigated showing it to be different for MSE walls and slopes. Some of the factors of safety used in programs ReSSA, ReSlope and MSEW are not defined in the same way thus their numerical value has to be examined independently; however, when the factor of safety is one, all definitions are equivalent. An appendix provides comparative summary of programs ReSlope, MSEW and ReSSA.

Fig.7.2 – Stability of geosynthetic reinforced soil structures - Dov Leshchinsky

L'immagine sottostante riporta in forma grafica i risultati del calcolo, il cui tabulato viene qui riportato in forma di estratto riassuntivo delle sollecitazioni e delle lunghezze dei teli.

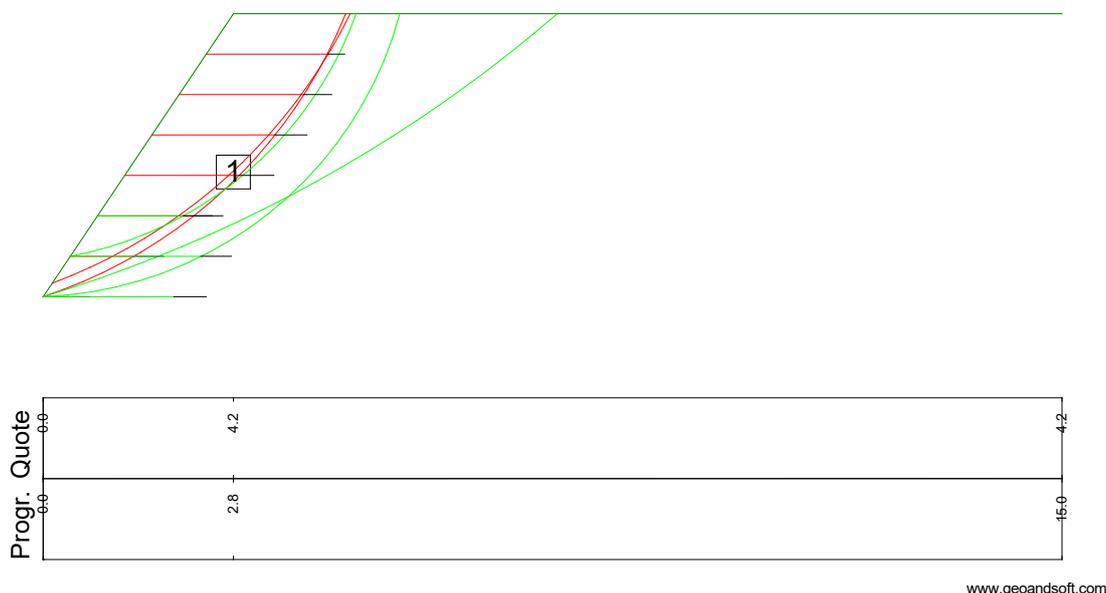


Fig.7.3 – Calcolo lunghezza teli

Il significato dell'elaborato grafico può apparire criptico, per cui si ritiene valga la pena spendere due parole per chiarire la simbologia adottata.

Le superfici di scivolamento in colore rosso sono quelle che contribuiscono a definire il diagramma delle spinte orizzontali in funzione della profondità a partire dalla sommità del manufatto, ovvero quelle che esercitano la massima spinta sulla struttura di rinforzo a partire da un terreno le cui caratteristiche sono state preventivamente degradate del coefficiente di sicurezza scelto, in questo caso 1,3: sono quindi le superfici critiche dal punto di vista dell'iterazione con gli elementi di rinforzo.

Le superfici verdi sono invece quelle che, indipendentemente dalla spinta esercitata sulle strutture di rinforzo, sono geometricamente collocate alla maggior profondità rispetto al fronte e, nel contesto della stabilità globale, devono essere superate almeno dai teli la cui resistenza, sommata a partire dal basso, è necessaria a contrastare la massima spinta esercitata in base alle superfici di scivolamento rosse.

I primi due teli hanno una resistenza sufficiente a contrastare la spinta esercitata dalla più bassa superficie di scivolamento rossa, ma devono superare le curve potenzialmente instabili per garantire l'ancoraggio dei teli stessi.

La seconda curva rossa viene presa in considerazione perché nella parte sommitale risulta leggermente più interna rispetto alla prima analizzata, ma non gode più del contributo stabilizzante del telo più basso, quindi entra in gioco la resistenza del terzo telo per garantirne il contenimento, che anche in questo caso deve essere spinto al di là di una superficie verde, che però non è più calcolata a partire dal primo telo, la cui quota di carico (valutata come frazione del diagramma di spinta orizzontale) è già stata stabilizzata, ma dalla più profonda superficie con fattore di sicurezza inferiore a 1,3 passante per il secondo telo dal basso, il che ne spiega la riduzione della lunghezza.

Questi tre teli sono colorati in verde proprio per indicare che la lunghezza è stata definita in funzione delle più profonde superfici potenzialmente instabili.

Poiché per definizione tutti i teli devono essere comunque portati al di là delle superfici di scivolamento rosse, che sono quelle critiche per l'intensità della spinta esercitata sugli elementi stabilizzanti, e dato che da una certa quota in poi, a salire, le superfici verdi tendono ad essere interne a quelle rosse, queste ultime sono le uniche ad essere prese in considerazione (previa l'ovvia verifica geometrica) per determinare la lunghezza dei teli, e quindi sono colorate in rosso per spiegare che il ragionamento in base al quale viene determinata la lunghezza è differente da quello utilizzato per i teli colorati in verde.

Il tratto nero rappresenta in generale la lunghezza minima di infissione al di là della superficie scelta, tenendo conto della tensione verticale efficace e dell'angolo di attrito interno del terreno, ridotto in forma di riduzione della tangente dell'angolo stesso di un fattore 1,3.

Si osservi che la standardizzazione delle balze fa sì che le terre rinforzate, specie se di modesta altezza, risultino in generale ampiamente sovradimensionate soprattutto nella parte sommitale, e questo può ingenerare un po' di confusione in quanto non si deduce immediatamente la necessità della presenza di ogni singolo telo.

Si può però verificare dai tabulati la netta diminuzione delle sollecitazioni applicate ai teli più prossimi alla sommità del manufatto.

Ampliando molto il range dei possibili spessori delle singole balze, come presentato nell'esempio successivo, diventa più facile intuire anche graficamente il senso dei rapporti dinamici e geometrici, mentre imponendo a livello progettuale lo spessore fisso di 0,60 m tale approccio intuitivo risulta meno evidente.

PARAMETRI GEOTECNICI

Angolo di attrito [°]	30
Coesione [kN/m ²]	0
Peso di volume [kN/m ³]	19

PUNTI DEL PROFILO

N. punto	Progressiva [m]	Quota [m]
1	0	0
2	2.8	4.2
3	15	4.2

Forze Stabilizzanti

Ascissa Terreno [m]	Altezza Forze Stabilizzanti [m]	Forza Stabilizzante [kN]*	Lunghezza Teli Tieback [m]	Lunghezza Teli Compound [m]	Lunghezza Infissione [m]	Lunghezza Totale dei Teli [m]
0,0	0,0	8,38	0,21	1,92	0,47	2,40
0,4	0,6	7,10	0,93	1,92	0,44	2,37
0,8	1,2	5,82	1,41	1,26	0,42	1,84
1,2	1,8	4,51	1,68	0	0,51	2,19
1,6	2,4	3,21	1,81	0	0,47	2,28
2,0	3,0	1,93	1,83	0	0,40	2,24
2,4	3,6	0,64	1,79	0	0,24	2,03

(* si intendono kN per metro lineare di fronte)

Tabella 5.1 – Calcolo terre rinforzate

Si può constatare come il software abbia determinato che la spaziatura massima tra i teli, pari a 0,60 m (il valore di progetto), è sufficiente a garantire la stabilizzazione del fronte in terra rinforzata; diversamente avrebbe utilizzato una spaziatura ridotta, essendo disponibili per il calcolo spaziature inferiori fino ad un minimo di 0,10 m, che non sono stati però utilizzati in quanto non necessari.

Per quanto riguarda i fattori di sicurezza, essi sono sempre, per costruzione, superiori a 1,3, perché tale è il coefficiente riduttivo, nell'effettuare il calcolo della spinta esercitata sugli elementi di rinforzo, applicato alla coesione se presente ed alla tangente dell'angolo di attrito.

La spinta stessa è ottenuta tramite cicli ripetuti di singole analisi di stabilità, eseguite con il metodo di Sarma, partendo da una maglia di 10 x 10 centri, di grandi dimensioni, e riducendone le dimensioni ad ogni ciclo, centrandola nel contempo sull'area dove, nel ciclo precedente, si erano ottenute le massime sollecitazioni sui teli.

Poiché tutte le geogriglie hanno una lunghezza di infissione sufficiente a garantirne l'efficacia operativa, si può calcolare con semplicità un fattore di sicurezza tradizionale come rapporto tra le resistenze totali dei teli, eventualmente ridotta dei canonici coefficienti di degrado dei materiali, e la massima forza stabilizzante dei tabulati risultante in corrispondenza della quota zero, quantità che dovrà ancora essere moltiplicato per il valore di 1,3 precedentemente utilizzato come parametro riduttivo delle resistenze a taglio del materiale di riempimento.

Come controprova si presenta anche un elaborato di calcolo in cui la spaziatura massima tra i teli è stata incrementata portandola (ovviamente ai soli fini della verifica numerica) a 1,80 m.

In questo caso è risultato che per i teli più bassi, maggiormente sollecitati, la spaziatura massima ammissibile è di almeno 1,10 m, inferiore al massimo ammesso in fase di parametrizzazione.

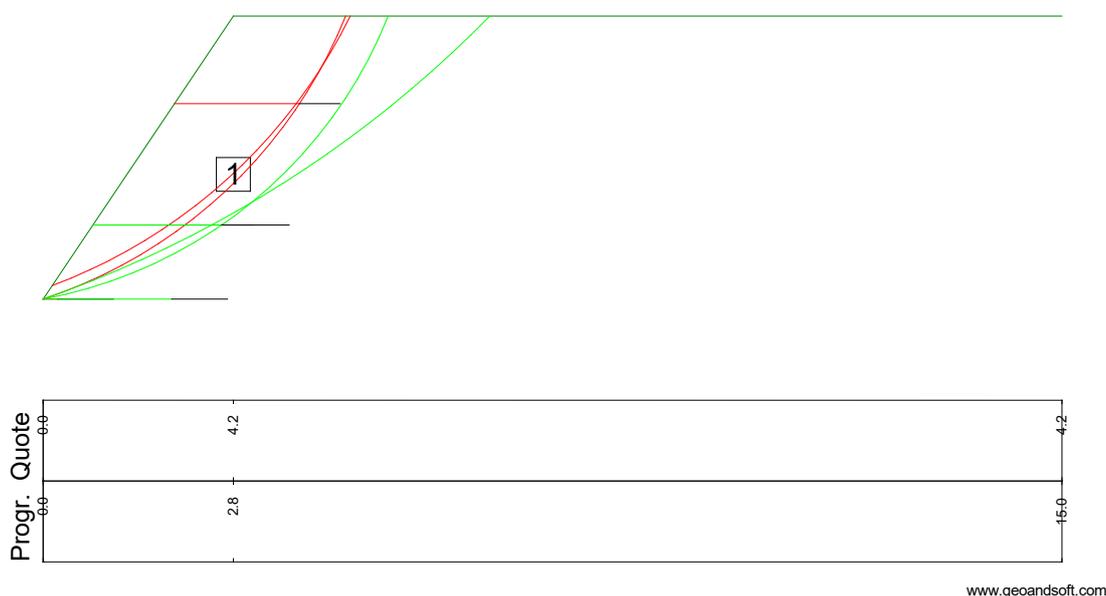


Fig.7.4 – Calcolo lunghezza teli

È infine stata eseguita un'ultima verifica, applicando un sovraccarico verticale di 20 kPa ai tre metri di terra rinforzata più prossimi al ciglio, per simulare il passaggio a monte di un grosso mezzo di trasporto (escavatore, betoniera, autocarro per la rimozione di macerie).

In questo caso, dal calcolo è risultato necessario un allungamento dei teli ma non un incremento della resistenza delle geogriglie, come risulta dall'immagine seguente.

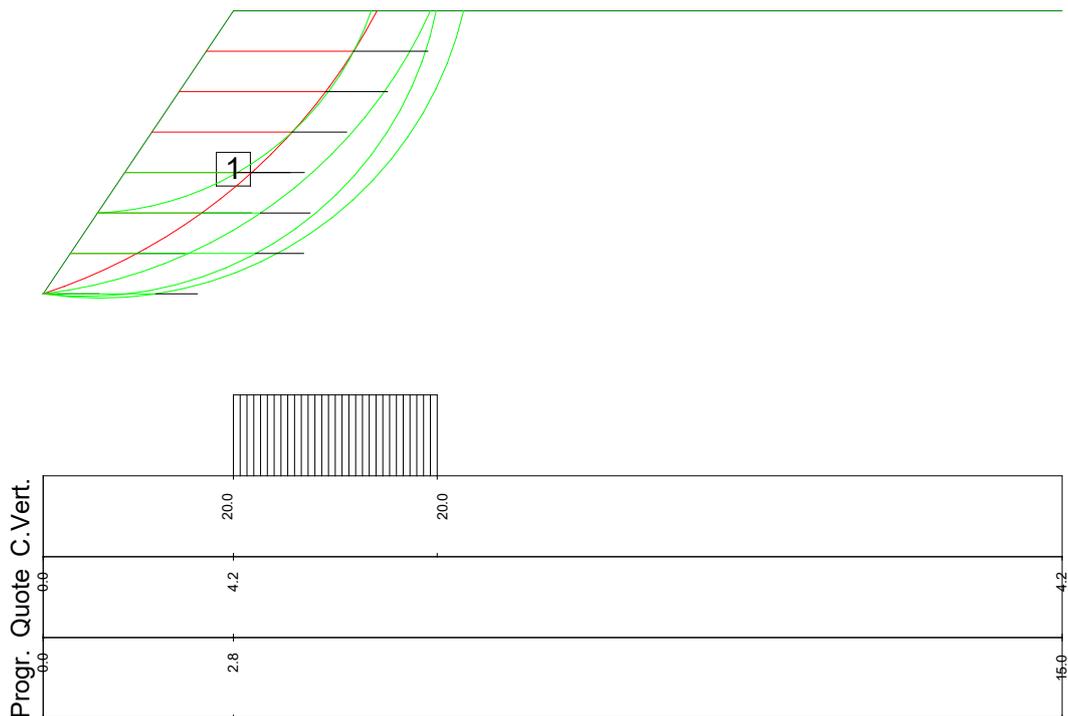


Fig.7.5 – Calcolo lunghezza teli

Per completezza si riportano le caratteristiche di diverse tipologie di geogriglie disponibili. Si osservi che il modello 20/20, con una resistenza di 25 kN/m, è quello che presenta la minima resistenza a trazione.

Ne consegue che il rilevato risulta verificato anche per qualsiasi altra tipologia con resistenza a trazione maggiore, ferma restando la prescrizione di 0,60 m di spaziatura e di lunghezza maggiore di 3,5 m.

VIGANO PAVITEX		CE		PAVIROCK TPV		PRODUZIONE STANDARD		VIG	
TABELLA RIEPILOGATIVA: Rev 119									
DESCRIZIONE: Geogriglia tessuta (GGR)									
COMPOSIZIONE: Poliestere alta tenacità con rivestimento PVC									
CARATTERISTICHE FISICHE		20/20	35/20	55/20	80/20	110/20	150/20	200/20	
Apertura maglia		mm	25x25	25x25	25x25	25x25	25x25	25x25	-
CARATTERISTICHE MECCANICHE									
Resistenza a trazione longitudinale MD		kN/m	25,0	40,0	60,0	85,0	115,0	155,0	205,0
Resistenza a trazione trasversale CMD		kN/m	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Allungamento a carico max longitudinale MD		%	12	12	12	12	12	12	12
Allungamento a carico max trasversale CMD		%	12	12	12	12	12	12	12
PARAMETRI CARATTERISTICI									
Resistenza a trazione MD al 2% di allungamento		kN/m	5,0	7,5	13,0	18,0	25,0	34,0	38,0
Resistenza a trazione MD al 5% di allungamento		kN/m	8,0	13,0	22,0	25,0	32,0	47,0	58,0
NOTE									
Sono indicati i valori nominali desunti dalla elaborazione statistica delle prove di laboratorio eseguite sul prodotto.									
Viganò Pavitex S.p.A. si riserva il diritto di aggiornare i dati indicati in qualsiasi momento e senza preavviso. Tolleranza sulle dimensioni dei rotoli ± 5%.									
Su richiesta sono disponibili altre grammature. Altre informazioni sono disponibili sulle schede dei singoli prodotti.									

Fig.7.6 – Caratteristiche teli

7.1 Effettivo dimensionamento

Il precedente calcolo è stato predisposto per garantire lo schema costruttivo che garantisca il conseguimento del coefficiente di sicurezza minimo previsto.

Va da sé che qualunque configurazione progettuale che preveda geo-griglie più resistenti, più fitte o più lunghe risulterà, a maggior ragione, verificata.

Poiché nei lavori di ripristino si voleva ottenere una riprofilatura del versante simile allo stato originale antecedente all'evento franoso, si è predisposto un manufatto con un interasse delle geo-griglie pari a 60 cm ed una lunghezza di infissione pari a 600 cm per ogni telo.

In questo modo si è potuto colmare la concavità risultata in seguito allo svuotamento di materiale dovuto al movimento franoso.

Nell'immagine sottostante è riportata la planimetria dell'intervento di consolidamento con terra rinforzata che è stato effettivamente eseguito.

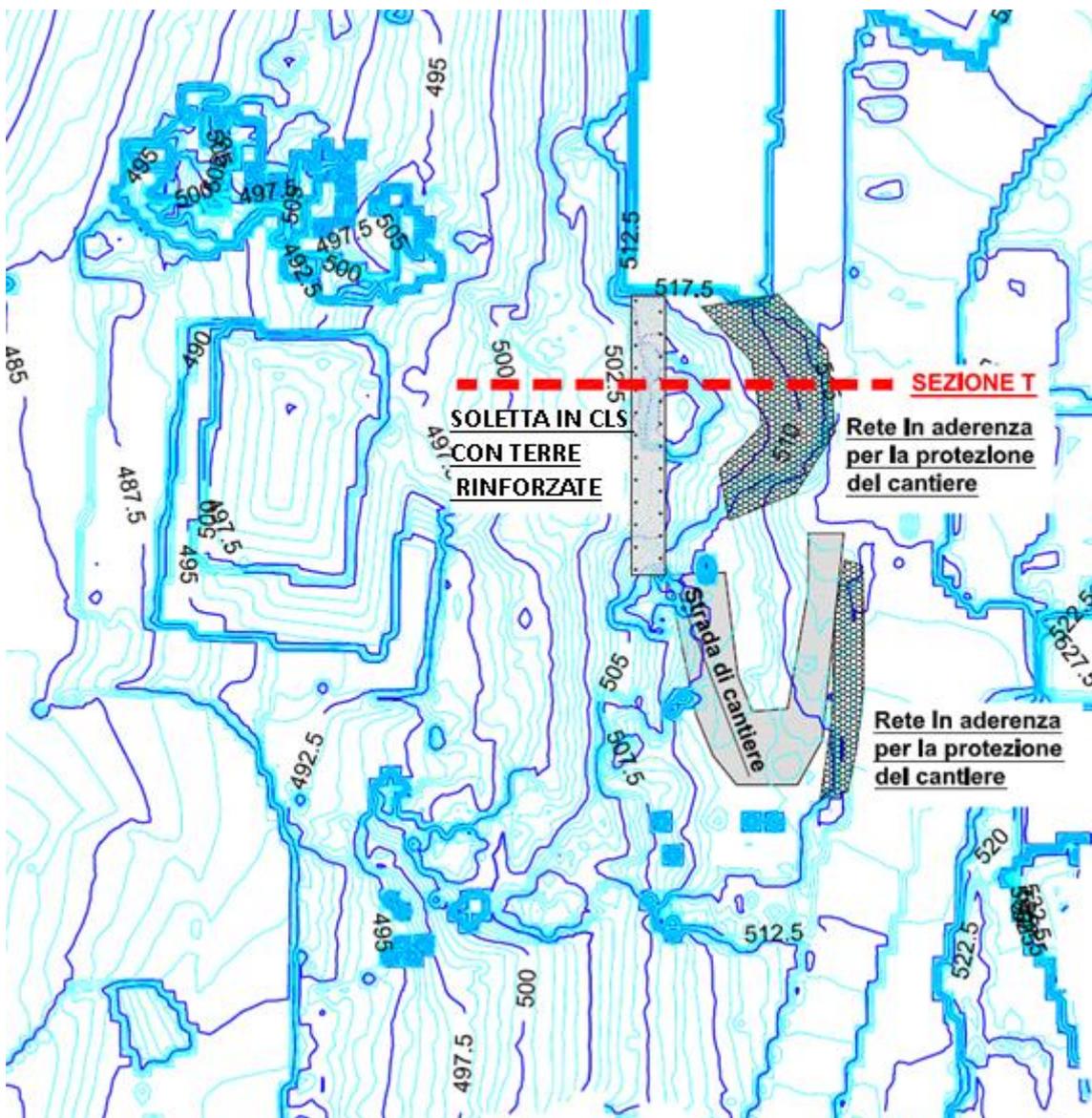


Fig.7.7 – Planimetria interventi

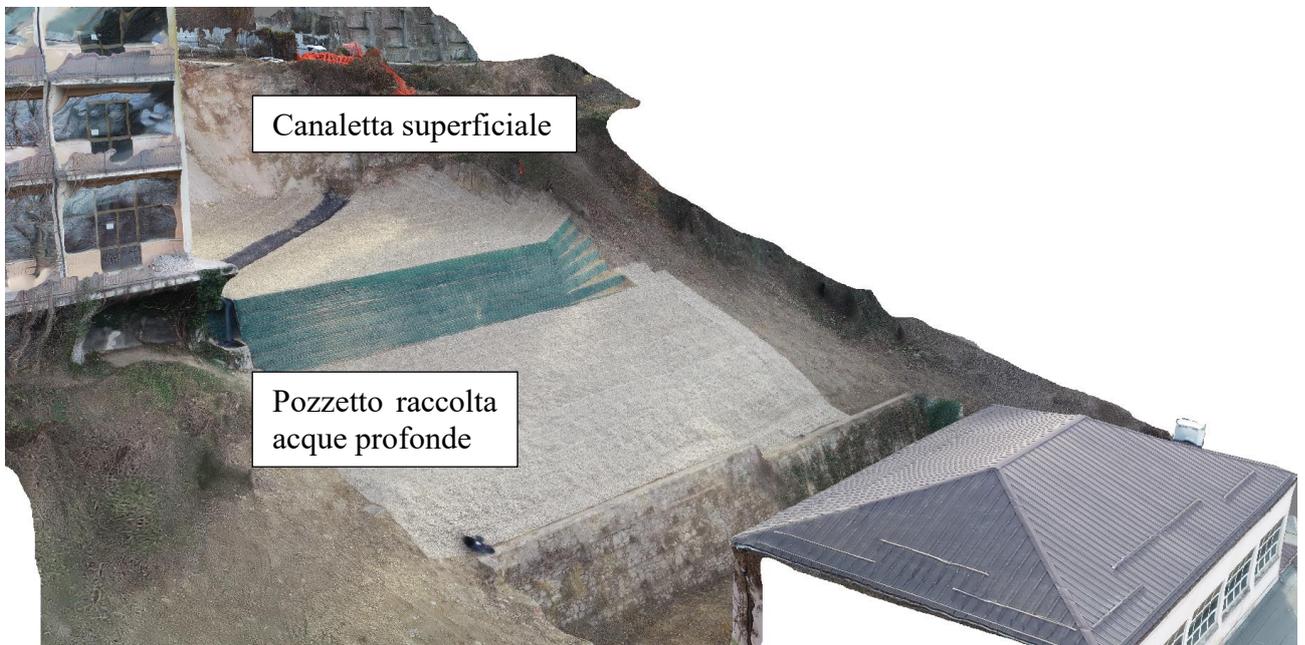


Fig.7.10 – Intervento riprofilatura eseguito

7.2 Regimazione idraulica della terra rinforzata

Premessa indispensabile per l'efficienza dei rilevati è che venga assicurato un corretto drenaggio dei rilevati stessi.

Tale risultato in parte viene assicurato dall'utilizzo di materiali di riempimento caratterizzati da un elevato grado di permeabilità, in parte dall'utilizzo di accorgimenti atti ad impedire l'eccessiva infiltrazione delle acque meteoriche all'interno del corpo di frana.

7.2.1 Regimazione superficiale



Come rilevabile dalle foto riprese nel corso delle lavorazioni, alla sommità del rilevato è stata messa in opera una canaletta in geocomposito multistrato costituito sostanzialmente da una parte inferiore impermeabile atta ad impedire il ristagno e l'infiltrazione delle acque meteoriche superficiali e da un agugliato superficiale destinato ad aumentare la resistenza allo scorrimento dell'acqua impedendone così la tracimazione e l'erosione delle sponde della canaletta, fenomeno che ovviamente ne vanificherebbe la presenza.

TRENCHMAT S

PRODUZIONE STANDARD



VIGANO PAVITEX S.P.A.

TABELLA RIEPILOGATIVA: Rev 119

DESCRIZIONE: Geocomposito (GCO) costituito da una geostuoia antierosiva (GMA), un geotessile nontessuto (GTX-N) e una pellicola impermeabile (PL)

COMPOSIZIONE: Polipropilene (GMA), poliestere (GTX-N), polietilene (PL)

CARATTERISTICHE FISICHE

Massa areica	g/m ²	890	EN ISO 9864
Spessore a 2 kPa	mm	15,0	EN ISO 9863

CARATTERISTICHE MECCANICHE

Resistenza a trazione longitudinale MD	kN/m	10,0	EN ISO 10319
Resistenza a trazione trasversale CMD	kN/m	10,0	EN ISO 10319
Allungamento a carico max longitudinale MD	%	50	EN ISO 10319
Allungamento a carico max trasversale CMD	%	50	EN ISO 10319
Resistenza al punzonamento statico CBR	kN	1,8	EN ISO 12236
Perforazione al cone drop test	mm	10	EN ISO 13433
Efficienza della protezione	N	180	EN 14574

NOTE

Sono indicati i valori nominali desunti dalla elaborazione statistica delle prove di laboratorio eseguite sul prodotto.

Viganò Pavitex S.p.A. si riserva il diritto di aggiornare i dati indicati in qualsiasi momento e senza preavviso. Tolleranza sulle dimensioni dei rotoli $\pm 5\%$.

Su richiesta sono disponibili altre grammature. Altre informazioni sono disponibili sulle schede dei singoli prodotti.

Fig. 7.11 – Caratteristiche materiali regimazione acque superficiale

7.2.2 Regimazione sub-superficiale

Per quanto riguarda invece le acque di circolazione sub-superficiale si è provveduto alla posa, a tergo del materiale di riempimento, di un geo-composito drenante costituito da un agugliato caratterizzato da una permeabilità molto elevata incorporato tra due strati di tessuto non tessuto atti a trattenere le particelle fini che, a lungo termine, potrebbero intasare il prodotto vanificandone la presenza.

Il drenaggio è completato dalla posa di un tubo microfessurato alla base dei teli drenanti, in grado di collettare ed allontanare le acque sotterranee da essi intercettate.

TABELLA RIEPILOGATIVA: Rev 119

DESCRIZIONE: Geocomposito drenante (GCO) costituito da una geostuoia (GMA) accoppiata su entrambi i lati ad un geotessile nontessuto (GTX-N)

COMPOSIZIONE: Polipropilene (GMA, GTX-N)

CARATTERISTICHE FISICHE		2F5	2F8	2F20	2F20L		
Massa areica	g/m ²	600	700	850	700	EN ISO 9864	
Spessore a 2 kPa	mm	5,5	8,0	20,0	20,0	EN ISO 9863	
Resistenza a trazione longitudinale MD	kN/m	12,0	12,0	13,0	13,0	EN ISO 10319	
Resistenza a trazione trasversale CMD	kN/m	12,0	12,0	13,0	13,0	EN ISO 10319	
CAPACITA' DRENANTE NEL PIANO MD							
q=20 kPa	i=1	l/s*m	1,00	2,10	4,00	3,30	EN ISO 12958
	i=0,1	l/s*m	0,20	0,55	1,50	0,85	EN ISO 12958
	i=0,04	l/s*m	0,12	0,36	0,85	0,50	EN ISO 12958
q=50 kPa	i=1	l/s*m	-	1,75	1,65	1,00	EN ISO 12958
	i=0,1	l/s*m	-	0,45	0,45	0,22	EN ISO 12958
	i=0,04	l/s*m	-	0,30	0,30	0,15	EN ISO 12958
q=100 kPa	i=1	l/s*m	-	1,35	0,40	0,25	EN ISO 12958
	i=0,1	l/s*m	-	0,40	0,10	0,05	EN ISO 12958
	i=0,04	l/s*m	-	0,25	0,06	0,03	EN ISO 12958

NOTE

Sono indicati i valori nominali desunti dalla elaborazione statistica delle prove di laboratorio eseguite sul prodotto.

 Vigano Pavitex S.p.A. si riserva il diritto di aggiornare i dati indicati in qualsiasi momento e senza preavviso. Tolleranza sulle dimensioni dei rotoli $\pm 5\%$.

Su richiesta sono disponibili altre grammature. Altre informazioni sono disponibili sulle schede dei singoli prodotti.

Fig.7.12 – Caratteristiche materiali regimazione acque sub-superficiale

Come anticipato, l'utilizzo di tali accorgimenti, unitamente al successivo rinverdimento del manufatto che ovviamente contribuisce sul lungo periodo a facilitare il deflusso delle acque meteoriche, consente di mantenere la struttura pressoché priva di acqua, fatta eccezione ovviamente per i pochi decimetri superficiali, in corrispondenza dei casseri in rete elettrosaldata, che vengono deliberatamente riempiti con terreno agrario al fine di facilitare il rapido rinverdimento della terra rinforzata.

7.2.3 Pseudo-coesione

Ai fini delle verifiche di stabilità a più ampia scala si può convertire la resistenza delle geogriglie in una resistenza a taglio da utilizzare in modo equivalente ad una pseudo-coesione.

Questo è possibile nonostante il fatto ovvio che i teli resistono a trazione ma sono estremamente flessibili.

In condizioni di deformazione incipiente, infatti, i teli assumono localmente, in corrispondenza della superficie di scivolamento, una sezione a forma di *S* per la cui conformazione il tratto centrale del telo si dispone in direzione sub-verticale o quanto meno inclinata, offrendo quindi una resistenza anche in direzione parallela allo scivolamento e perpendicolare alla disposizione originale del telo.

Nei calcoli di stabilità globale è stata quindi assegnata al manufatto in terra rinforzata una pseudo-coesione pari alla resistenza del telo meno resistente tra quelli forniti a catalogo dal Produttore.

Applicando così una resistenza a trazione di 25 kN/m, valore che viene diviso per l'interasse tra i teli di 0,6 m, ed al quale si applica un ulteriore coefficiente riduttivo pari a 2 per tener conto sia dell'invecchiamento del materiale sia dell'inclinazione della superficie di scivolamento, che porta ad una distribuzione della resistenza dei teli su una superficie più ampia di quella rilevabile lungo una superficie puramente verticale, si ottiene un valore di pseudo-coesione pari a:

$$\text{pseudo-coesione} = 25 \text{ kN/m} / 0,6 \text{ m} / 2 = 20 \text{ kPa.}$$

7.3 Stabilità generale del versante: il muro a monte della Palestra Metavia

Al fine di verificare la stabilità globale del versante sono state selezionate tre situazioni: la verifica della stabilità dell'antico muro a monte della Palestra Metavia, la verifica globale del rilevato in terra rinforzata e la verifica complessiva con superfici circolari con curvatura ridotta, tali da comprendere rilevato e muro ma senza risentire dell'effetto stabilizzante del substrato profondo.

7.4 metodologia di calcolo adottata

Il problema dell'analisi di stabilità è approfonditamente studiato da tanto tempo e molti metodi universalmente noti quali quelli proposti da Bishop, Jambu, Bell, Morgenstern e Price, vengono abitualmente utilizzati per analizzare le condizioni di stabilità dei versanti in terreni stratificati ed in presenza di acqua.

Si è però ritenuto opportuno presentare la descrizione della metodologia di calcolo utilizzata, proposta da S. K. Sarma [10] perché è generalmente meno noto, ed ha la peculiarità di operare attraverso la ricerca del valore di accelerazione orizzontale che porta il pendio alle condizioni di equilibrio limite, caratteristica che lo rende particolarmente indicato per la progettazione delle terre rinforzate, come si vedrà nel capitolo dedicato alla metodologia di calcolo di tali strutture.

7.4.1 Metodo di Sarma

Come anticipato il metodo di Sarma [10] e [11] è un metodo generale di analisi in condizioni di equilibrio limite che può essere utilizzato per la verifica della stabilità di pendii con geometria qualunque, con superfici di scivolamento circolari, piane o costruite arbitrariamente per punti tramite l'introduzione diretta delle coordinate.

Ne deriva quindi una piena applicabilità sia nei casi di pendii in frana, permettendo di eseguire la verifica lungo le superfici di scorrimento che meglio approssimano quella riconosciuta con le indagini, sia negli altri casi, con l'esame di superfici di scorrimento cinematicamente possibili in numero sufficiente per ricercare la superficie alla quale corrisponda, nel caso considerato, il coefficiente di sicurezza più basso.

Ricerca del fattore di sicurezza

Il fattore di sicurezza coincide con il valore che assume un parametro riduttivo (PR) delle caratteristiche geotecniche reattive (tangente dell'angolo di attrito e coesione) quando esso porta all'annullamento dell'accelerazione critica.

L'analisi viene effettuata nell'ipotesi che le superfici di scivolamento possano essere schematizzate attraverso sviluppi cilindrici, e quindi i calcoli sono effettuati per uno spessore unitario nella direzione del fronte.

La formulazione analitica del problema è in effetti piuttosto complessa, pertanto viene riportata solo sinteticamente nel seguito, mentre per uno studio esaustivo si consiglia la consultazione delle opere citate in bibliografia ed in particolare dell'articolo citato in precedenza, facilmente reperibile.

L'accelerazione critica è così definita:

$$k_c = AE/PE$$

dove, essendo n il numero dei conci:

$$\begin{aligned}
AE &= a_n + a_{n-1}e_n + a_{n-2}e_n e_{n-1} + \dots + a_1 e_n e_{n-2} \dots e_3 e_2 \\
PE &= p_n + p_{n-1}e_n + p_{n-2}e_n e_{n-1} + \dots + p_1 e_n e_{n-1} \dots e_3 e_2 \\
a_i &= q_i \left[(w_i + tv_i) \sin(\varphi_{bi} - \alpha_i) - th_i \cos(\varphi_{bi} - \alpha_i) + r_i \cos(\varphi_{bi}) + s_{i+1} \sin(\varphi_{bi} - \alpha_i - \delta_{i+1}) - s_i \sin(\varphi_{bi} - \alpha_i - \delta_i) \right] \\
p_i &= q_i w_i \cos(\varphi_{bi} - \alpha_i) \\
e_i &= q_i \left[\frac{\cos(\varphi_{bi} - \alpha_i + \varphi_{si} - \delta_i)}{\cos(\varphi_{si})} \right] \\
q_i &= \frac{\cos(\varphi_{si+1})}{\cos(\varphi_{bi} - \alpha_i + \varphi_{si+1} - \delta_{i+1})} \\
s_i &= c_{si} d_i - p w_i \tan(\varphi_{si}) \\
s_{i+1} &= c_{si+1} d_{i+1} - p w_{i+1} \tan(\varphi_{si+1}) \\
r_i &= \frac{c_{bi} b_i}{\cos(\alpha_i) - u_i \tan(\varphi_{bi})}
\end{aligned}$$

in cui:

$$\begin{aligned}
a_1 &= w_i + Tv_i \sin(Fb_i - \alpha_i) \\
a_2 &= Th_i \cos(Fb_i - \alpha_i) \\
a_3 &= r_i \cos(Fb_i) \\
a_4 &= s_{i+1} \sin(Fb_i - \alpha_i - D_{i+1}) \\
a_5 &= s_i \sin(Fb_i - \alpha_i - D_i)
\end{aligned}$$

essendo ancora, per l'i-esimo concio:

w_i - peso;

d_i, δ_i - lunghezza ed inclinazione del lato;

b_i, α_i - larghezza ed inclinazione della base;

c_{bi}, ϕ_{bi} - coesione ed angolo di attrito di base;

c_{si}, ϕ_{si} - coesione ed angolo di attrito laterale;

u_i - spinta idraulica normale lungo la base;

pw_i - spinta idraulica normale lungo il lato;

Tv_i, Th_i - forze esterne verticale ed orizzontale

La soluzione dell'equazione $kc(PR)=0$ è ottenuta per via numerica attraverso un procedimento iterativo che, assicurando un'elevata velocità ed affidabilità, restituisce un valore del fattore di sicurezza con un errore per difetto (rispetto a quello eventualmente calcolabile a mano in casi semplici con formulazioni analitiche) contenuto normalmente entro lo 0,01. Si osserva inoltre che viene presunta la simulazione di superfici di scivolamento tali da garantire la presenza di sole componenti positive (compressione) nelle forze scambiate tra i conci, per cui non vengono utilizzate superfici di scivolamento geometricamente incongruenti, ad esempio con concavità rivolta verso il basso, che possono talvolta generare componenti di trazione tra concio e concio.

Tali ipotesi sono valide per il caso specifico del tratto in frana al di sopra della Palestra Metavia, e sempre nel caso dell'applicazione alla verifica delle terre rinforzate.

7.4.2 Verifica di stabilità in assenza d'acqua

La prima verifica fatta prevede che le superfici di scivolamento passino al piede delle terre rinforzate, che il versante sia completamente drenato e che non vi siano elementi di contrasto ad un possibile scivolamento.

Litotipo 1:	phi [°] = 26	c [kN/m ²] = 20	gamma [kN/m ³] = 19
Litotipo 2:	phi [°] = 26	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 19
Litotipo 3:	phi [°] = 40	c [kN/m ²] = 10	gamma [kN/m ³] = 25
Litotipo 4:	phi [°] = 30	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 10
Litotipo 5:	phi [°] = 27	c [kN/m ²] = 7	gamma [kN/m ³] = 21

Metodo: Sarma

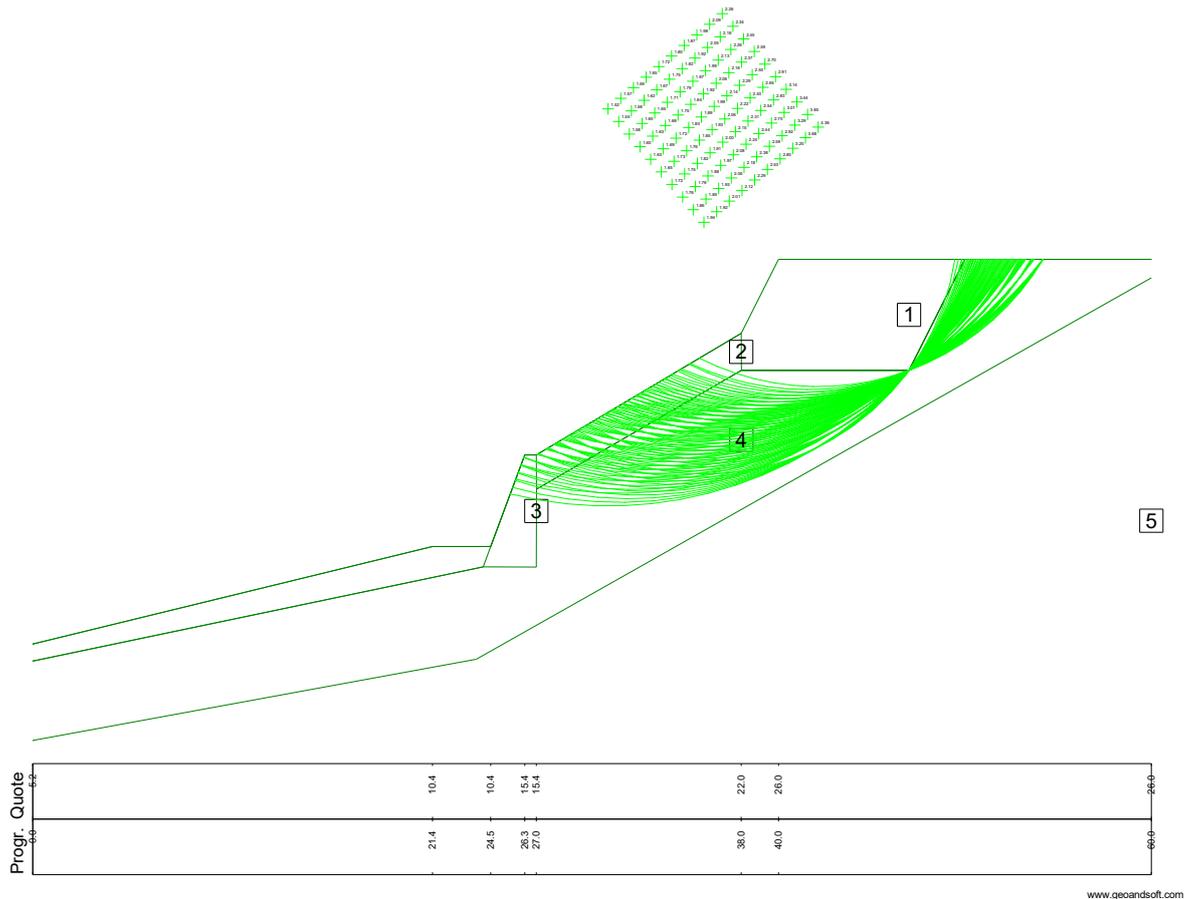


Fig.7.13 – Analisi stabilità senza falda

Fattore di sicurezza FS = 1,57.

7.4.3 Verifica di stabilità in presenza d'acqua

La seconda verifica fatta prevede che le superfici di scivolamento passino al piede delle terre rinforzate, che vi sia la presenza di una falda e che non vi siano elementi di contrasto ad un possibile scivolamento.

Litotipo 1:	phi [°] = 26	c [kN/m²] = 20	gamma [kN/m³] = 19
Litotipo 2:	phi [°] = 26	c [kN/m²] = 0	gamma [kN/m³] = 19
Litotipo 3:	phi [°] = 40	c [kN/m²] = 10	gamma [kN/m³] = 25
Litotipo 4:	phi [°] = 30	c [kN/m²] = 0	gamma [kN/m³] = 20
Litotipo 5:	phi [°] = 27	c [kN/m²] = 7	gamma [kN/m³] = 21
Gamma acqua [kN/m³] = 10			
Metodo: Sarma			

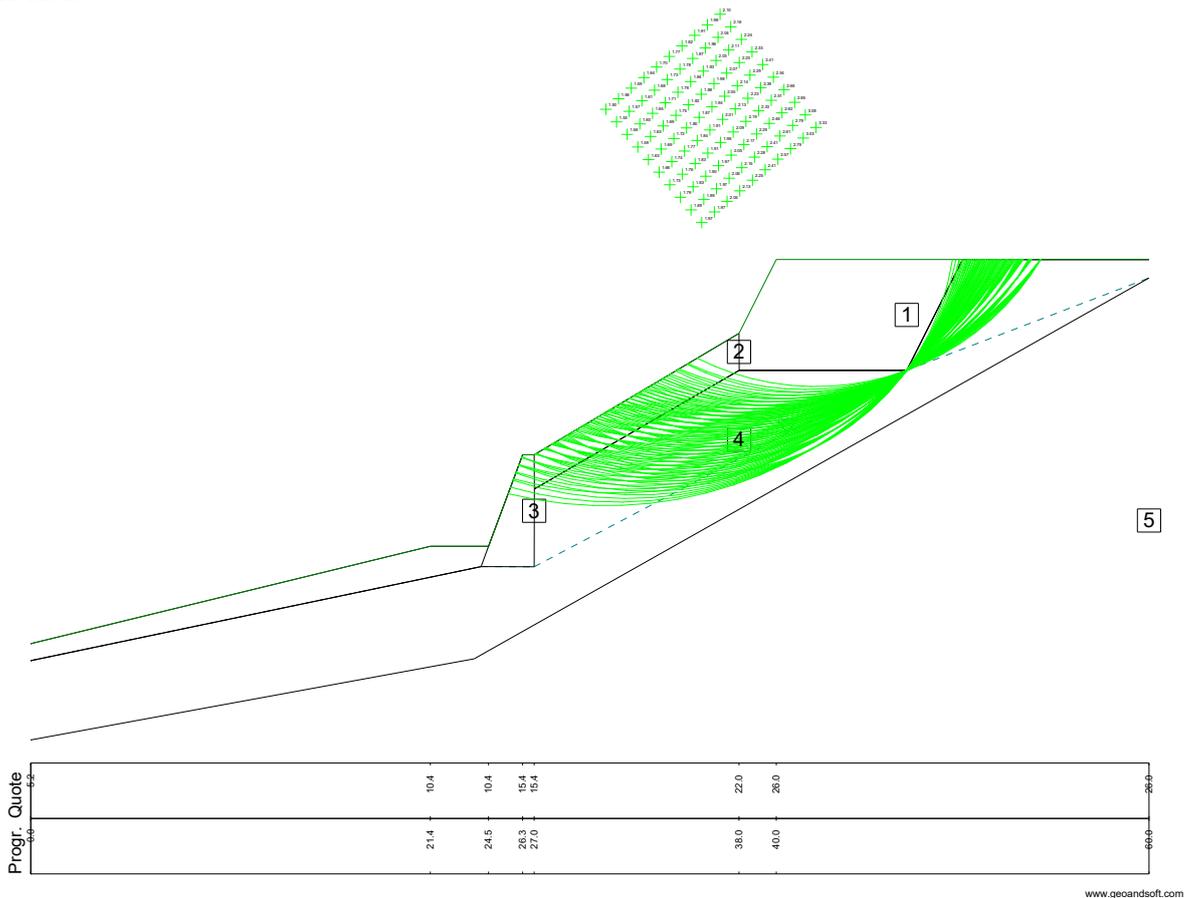


Fig.7.14 – Analisi stabilità con falda

Fattore di sicurezza FS = 1,50.

7.4.4 Verifica di stabilità in presenza d'acqua

La terza verifica fatta prevede che le superfici di scivolamento passino al piede delle terre rinforzate, che vi sia la presenza di una falda e che non vi siano elementi di contrasto ad un possibile scivolamento.

Litotipo 1:	phi [°] = 26	c [kN/m ²] = 20	gamma [kN/m ³] = 19
Litotipo 2:	phi [°] = 26	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 19
Litotipo 3:	phi [°] = 40	c [kN/m ²] = 10	gamma [kN/m ³] = 25
Litotipo 4:	phi [°] = 30	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 20
Litotipo 5:	phi [°] = 27	c [kN/m ²] = 7	gamma [kN/m ³] = 21
Gamma acqua [kN/m ³] = 10			
Metodo: Sarma			

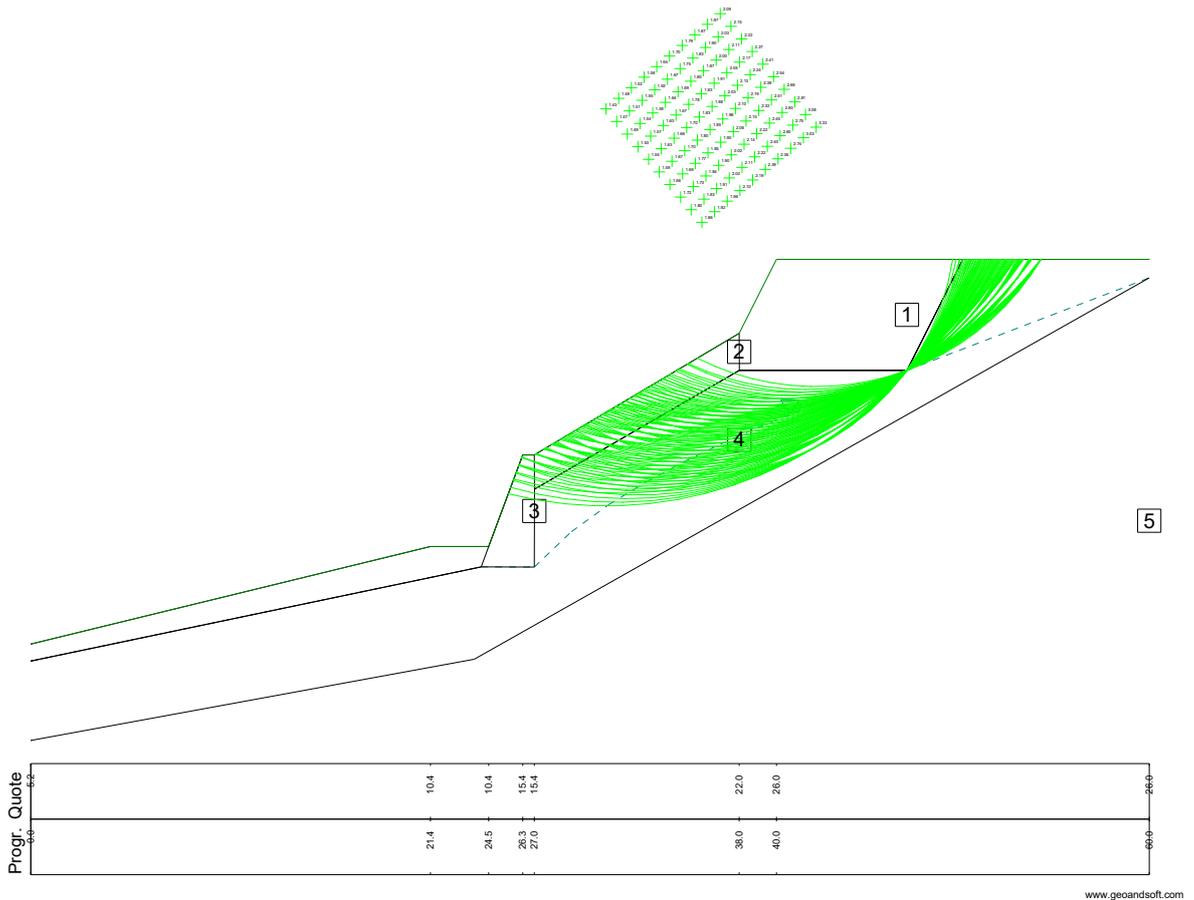


Fig.7.15 – Analisi stabilità con falda

Fattore di sicurezza FS = 1,44.

7.4.5 Verifica di stabilità in presenza d'acqua e sovraccarico

La terza verifica fatta prevede che le superfici di scivolamento passino al piede delle terre rinforzate, che vi sia la presenza di una falda, che vi sia la presenza di un sovraccarico e che non vi siano elementi di contrasto ad un possibile scivolamento.

Litotipo 1:	phi [°] = 26	c [kN/m ²] = 20	gamma [kN/m ³] = 19
Litotipo 2:	phi [°] = 26	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 19
Litotipo 3:	phi [°] = 40	c [kN/m ²] = 10	gamma [kN/m ³] = 25
Litotipo 4:	phi [°] = 30	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 20
Litotipo 5:	phi [°] = 27	c [kN/m ²] = 7	gamma [kN/m ³] = 21
Gamma acqua [kN/m ³] = 10			
Metodo: Sarma			

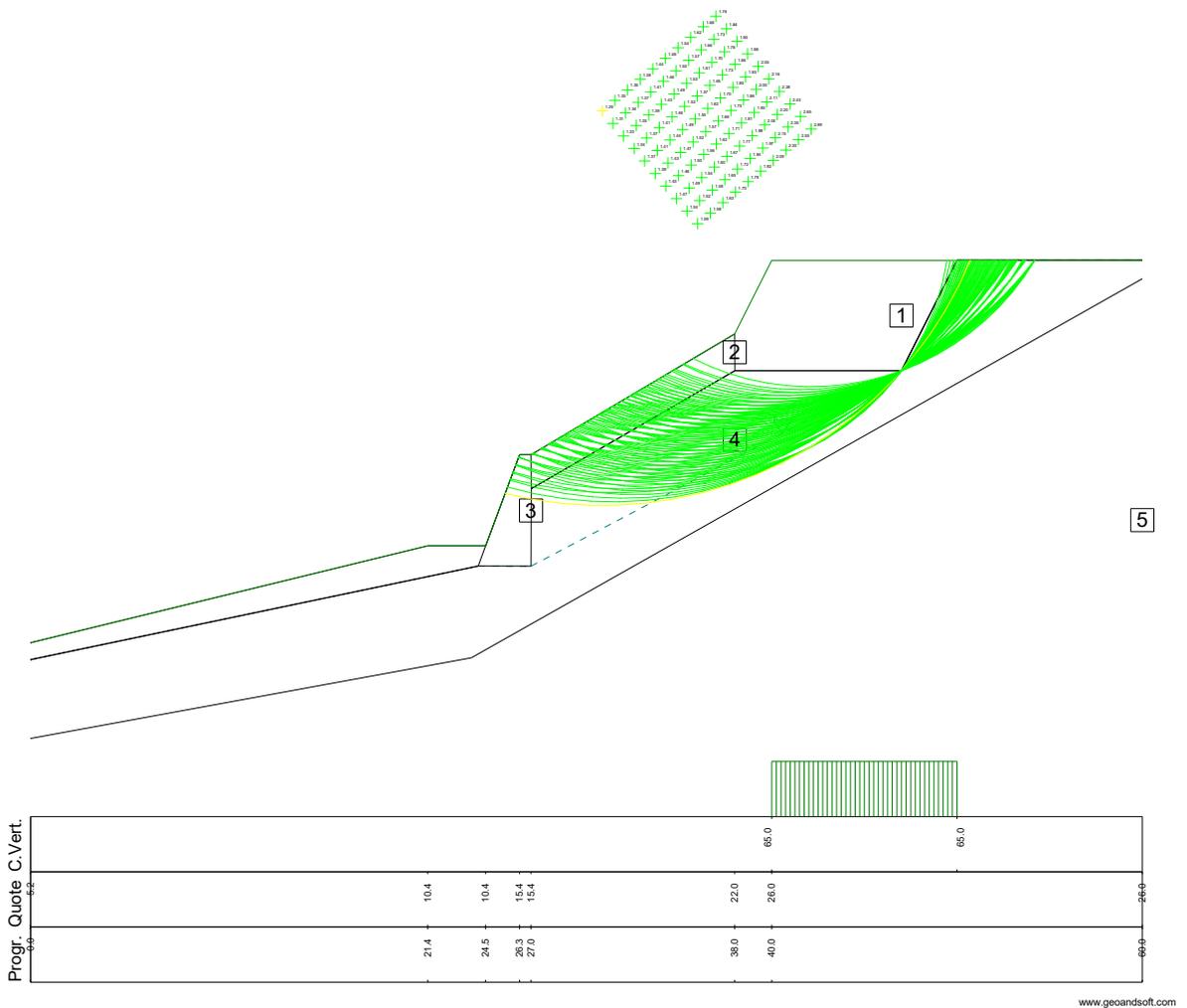


Fig.7.16 – Analisi stabilità con falda e sovraccarico

Fattore di sicurezza FS = 1,30.

7.4.6 Verifica di stabilità del muro di valle in assenza d'acqua

La prima verifica fatta prevede che le superfici di scivolamento passino a tergo del muro a monte della Palestra Metavia, che il versante sia completamente drenato e che non vi siano elementi di contrasto ad un possibile scivolamento.

Le modalità di posa della fondazione del muro sono ipotetiche e presumibilmente cautelative dal punto di vista del calcolo, dal momento che non sono risultati disponibili elaborati progettuali risalenti all'epoca della costruzione.

Litotipo 1:	phi [°] = 26	c [kN/m ²] = 20	gamma [kN/m ³] = 19
Litotipo 2:	phi [°] = 26	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 19
Litotipo 3:	phi [°] = 40	c [kN/m ²] = 10	gamma [kN/m ³] = 25
Litotipo 4:	phi [°] = 30	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 20
Litotipo 5:	phi [°] = 27	c [kN/m ²] = 7	gamma [kN/m ³] = 21

Metodo: Sarma

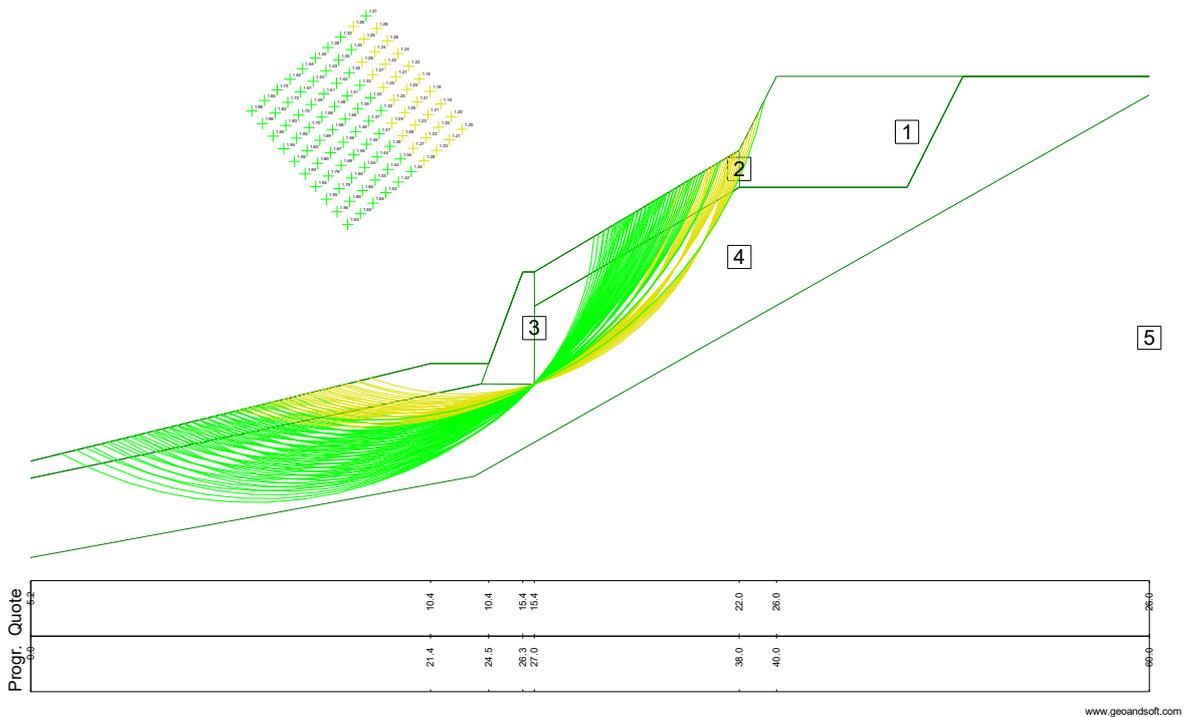


Fig.7.17 – Analisi stabilità senza falda

Il fattore di sicurezza minimo è risultato pari a 1,18.

7.4.7 Muro a monte della Palestra Metavia, senza contrasti e con falda

In questa ipotesi difficilmente verificabile per le opere drenanti eseguite sulla riprofilatura del versante, viene riportata la falda tra lo strato di riporto e il primo strato.

Litotipo 1:	phi [°] = 26	c [kN/m ²] = 20	gamma [kN/m ³] = 19
Litotipo 2:	phi [°] = 26	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 19
Litotipo 3:	phi [°] = 40	c [kN/m ²] = 10	gamma [kN/m ³] = 25
Litotipo 4:	phi [°] = 30	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 20
Litotipo 5:	phi [°] = 27	c [kN/m ²] = 7	gamma [kN/m ³] = 21
Gamma acqua [kN/m ³] = 10			
Metodo: Sarma			

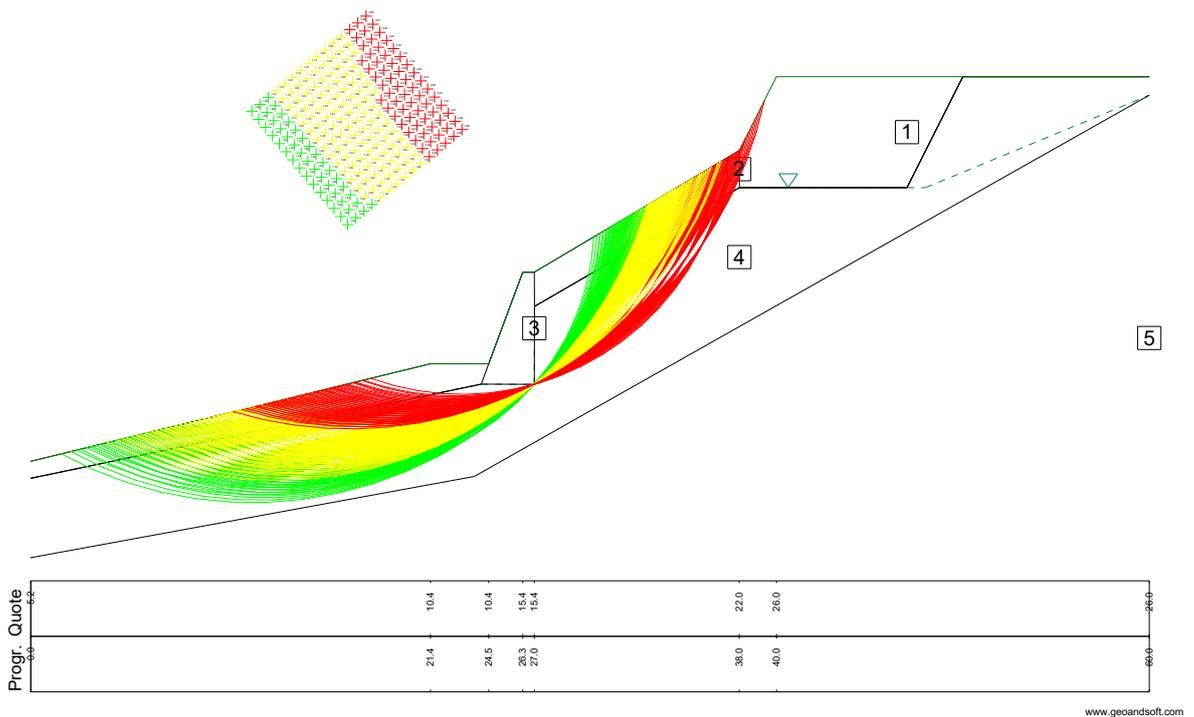


Fig.7.18 – Analisi stabilità acqua a livello campagna

Il coefficiente di sicurezza risulta essere pari a 0,84.

7.4.8 Muro a monte della Palestra Metavia, senza contrasti e con falda

In questa ipotesi difficilmente verificabile per le opere drenanti eseguite sulla riprofilatura del versante, viene riportata per semplicità un andamento del livello dell'acqua lineare.

Litotipo 1:	phi [°] = 26	c [kN/m ²] = 20	gamma [kN/m ³] = 19
Litotipo 2:	phi [°] = 26	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 19
Litotipo 3:	phi [°] = 40	c [kN/m ²] = 10	gamma [kN/m ³] = 25
Litotipo 4:	phi [°] = 30	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 20
Litotipo 5:	phi [°] = 30	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 10
Litotipo 6:	phi [°] = 27	c [kN/m ²] = 7	gamma [kN/m ³] = 21
Gamma acqua [kN/m ³] = 1E-08			
Metodo: Sarma			

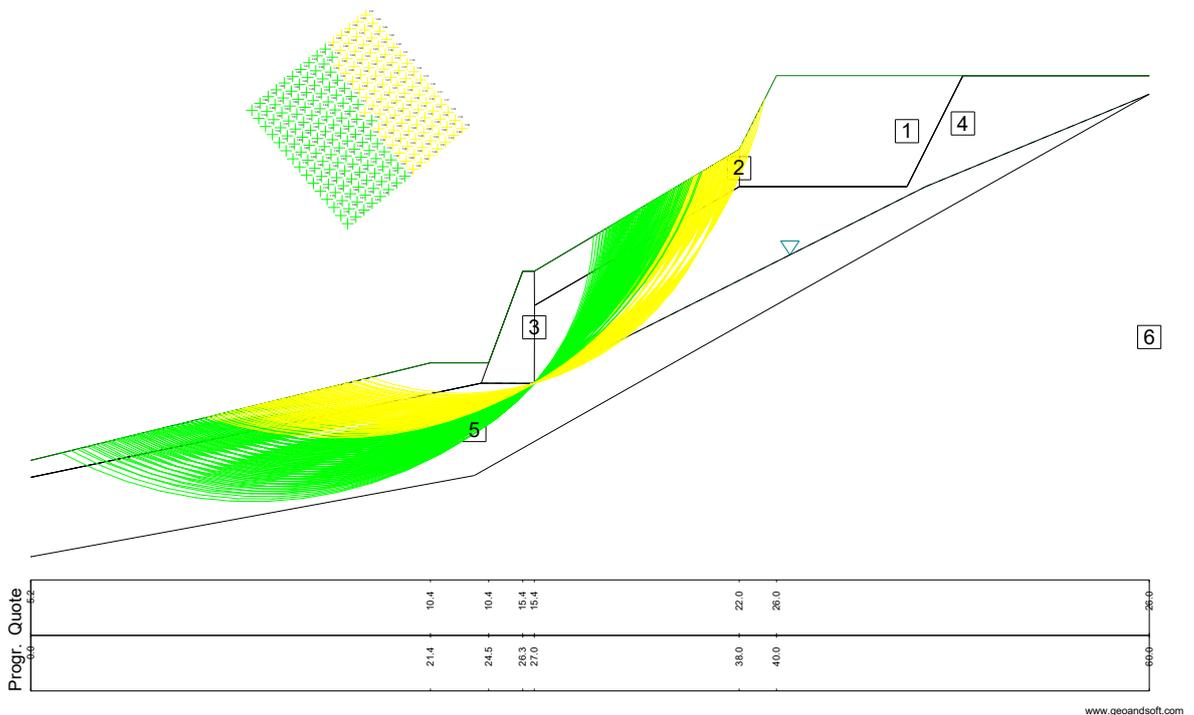


Fig.7.19 – Analisi stabilità con falda

Il coefficiente di sicurezza risulta essere pari a 1,15.

In questa ipotesi difficilmente verificabile per le opere drenanti eseguite sulla riprofilatura del versante, viene riportata per semplicità un andamento del livello dell'acqua lineare.

scala 1:250

Litotipo 1:	phi [°] = 26	c [kN/m ²] = 20	gamma [kN/m ³] = 19
Litotipo 2:	phi [°] = 26	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 19
Litotipo 3:	phi [°] = 40	c [kN/m ²] = 10	gamma [kN/m ³] = 25
Litotipo 4:	phi [°] = 30	c [kN/m ²] = 0	gamma [kN/m ³] = 20
Litotipo 5:	phi [°] = 27	c [kN/m ²] = 7	gamma [kN/m ³] = 21
Gamma acqua [kN/m ³] = 10			
Metodo: Sarma			

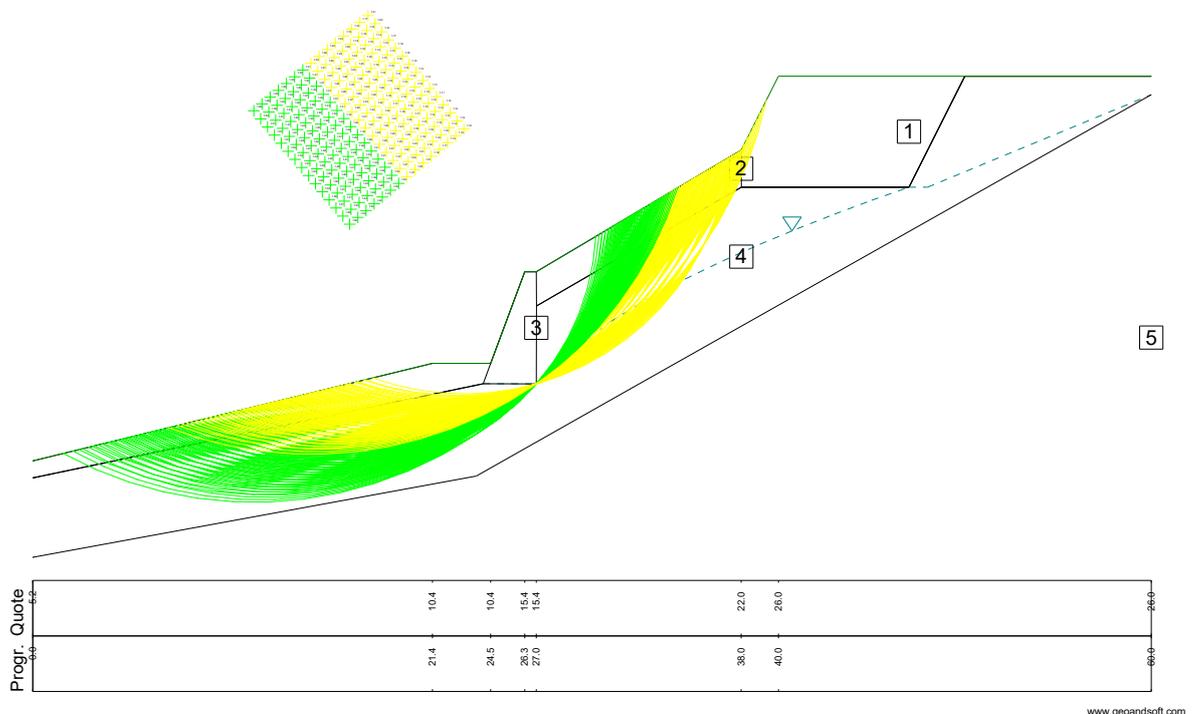


Fig.7.20 – Analisi stabilità con falda

Il coefficiente di sicurezza risulta essere pari a 1,10.

7.4.9 Consolidamento del Muro della Palestra Metavia

In questo capitolo si è effettuata una ricerca in *back-analysis* del valore delle sollecitazioni orizzontali che eventuali opere di stabilizzazione ed ancoraggio del muro dovranno complessivamente essere in grado di assorbire per garantire un coefficiente di sicurezza almeno pari a 1,3.

Sono state eseguite due verifiche: nella prima le potenziali superfici di scivolamento sono state fatte passare a valle della soletta su micropali a sostegno delle soprastanti terre rinforzate.

In questo caso la reazione delle opere di ancoraggio necessaria a ottenere il coefficiente di sicurezza richiesto è risultata pari a 108 kN per metro lineare di struttura muraria.

Litotipo 1:	phi [°] = 26	c [kN/m²] = 20	gamma [kN/m³] = 19
Litotipo 2:	phi [°] = 26	c [kN/m²] = 0	gamma [kN/m³] = 19
Litotipo 3:	phi [°] = 40	c [kN/m²] = 10	gamma [kN/m³] = 25
Litotipo 4:	phi [°] = 30	c [kN/m²] = 0	gamma [kN/m³] = 20
Litotipo 5:	phi [°] = 27	c [kN/m²] = 7	gamma [kN/m³] = 21
Gamma acqua [kN/m³] = 10			
Metodo: Sarma			

C	C (res. critica)= 90	<table border="0"> <tr> <td>RN FS</td> <td>FS: fatt. sicurezza ottenibile</td> </tr> <tr> <td>X% RT</td> <td>RN: reaz. per avere FS= 1.3</td> </tr> <tr> <td></td> <td>RT: res. a rottura del terreno</td> </tr> <tr> <td></td> <td>%: utilizzo resistenza critica</td> </tr> <tr> <td></td> <td>X: L=lineare; T=rottura terreno</td> </tr> <tr> <td></td> <td>P=precarico; R=residuo</td> </tr> </table>	RN FS	FS: fatt. sicurezza ottenibile	X% RT	RN: reaz. per avere FS= 1.3		RT: res. a rottura del terreno		%: utilizzo resistenza critica		X: L=lineare; T=rottura terreno		P=precarico; R=residuo
RN FS	FS: fatt. sicurezza ottenibile													
X% RT	RN: reaz. per avere FS= 1.3													
	RT: res. a rottura del terreno													
	%: utilizzo resistenza critica													
	X: L=lineare; T=rottura terreno													
	P=precarico; R=residuo													
P	P (precarico)= 0													
R	R (res. residua)= 0													

F.opera	
F.pendio	

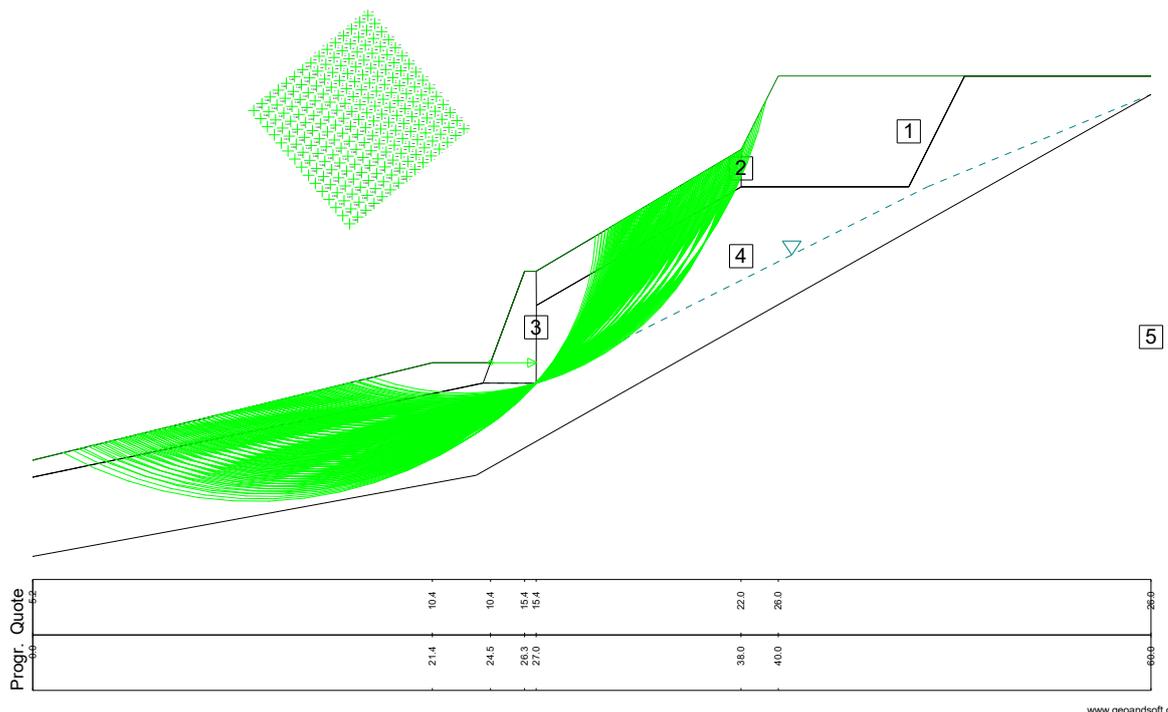


Fig.7.21 – Analisi stabilità con opera di sostegno

Avendo nei capitoli precedenti determinato in 108 kN/m la resistenza che gli ancoraggi dovranno offrire, è possibile scegliere la resistenza a trazione delle barre di progetto in funzione dell'interasse tra i tiranti.

Il Prezziario della Regione Piemonte offre tre possibili scelte, con “capacità” espresse in multipli di 15 tonnellate, evidentemente ispirandosi per analogia alla ormai obsoleta resistenza di progetto del trefolo in acciaio armonico da 0,6”.

18.A20.B15.005	Esecuzione di tiranti in barre tipo Dywidag mediante perforazione a roto - percussione con batteria perforante diametro 90 - 140 mm attraverso murature e terreni di qualsiasi natura e consistenza, compresa l'iniezione cementizia fino ad un massimo di due volte il volume teorico risultante dalla perforazione, compresa altresì la fornitura e posa dell'armatura, delle piastre d'ancoraggio delle testate, dadi di bloccaggio nonché la messa in tensione finale esclusa la formazione dei ponteggi ed il rivestimento, ove necessario, dei tiranti: per tiranti capaci di 30 t	m	81.33
18.A20.B15.010	Esecuzione di tiranti in barre tipo Dywidag mediante perforazione a roto - percussione con batteria perforante diametro 90 - 140 mm attraverso murature e terreni di qualsiasi natura e consistenza, compresa l'iniezione cementizia fino ad un massimo di due volte il volume teorico risultante dalla perforazione, compresa altresì la fornitura e posa dell'armatura, delle piastre d'ancoraggio delle testate, dadi di bloccaggio nonché la messa in tensione finale esclusa la formazione dei ponteggi ed il rivestimento, ove necessario, dei tiranti: per tiranti capaci di 45 t	m	88.56
18.A20.B15.015	Esecuzione di tiranti in barre tipo Dywidag mediante perforazione a roto - percussione con batteria perforante diametro 90 - 140 mm attraverso murature e terreni di qualsiasi natura e consistenza, compresa l'iniezione cementizia fino ad un massimo di due volte il volume teorico risultante dalla perforazione, compresa altresì la fornitura e posa dell'armatura, delle piastre d'ancoraggio delle testate, dadi di bloccaggio nonché la messa in tensione finale esclusa la formazione dei ponteggi ed il rivestimento, ove necessario, dei tiranti: per tiranti capaci di 60 t	m	95.76

Fig.7.22 – Estratto da prezziario Regione Piemonte

Poiché i prodotti commerciali presentano caratteristiche specifiche ovviamente diverse da quelle del Prezziario, è opportuno prevedere barre reali di resistenza leggermente inferiori a quelle della voce di prezziario che sarà utilizzata, per evitare possibili contestazioni da parte dell'Impresa assegnataria dei lavori.

GEWI® Plus S670/800 Threadbar

Diametro nominale Ø [mm]	Tensione snervamento / tensione rottura $f_{p0,2k}/f_{tk}$ [N/mm ²]	Sezione trasversale A [mm ²]	Carico snervamento F_{yk} [kN]	Carico ultimo F_{tk} [kN]	Peso [kg/m]	Peso DCP [kg/m]	Omologazione
18	670/800	254	170	204	2.00	5.4	
22	670/800	380	255	304	2.98	6.5	
25	670/800	491	329	393	3.85	7.0	
28	670/800	616	413	493	4.83	8.6	
30	670/800	707	474	565	5.55	9.0	
35	670/800	962	645	770	7.55	11.3	
43	670/800	1,452	973	1,162	11.40	15.8	
57.5	670/800	2,597	1,740	2,077	20.38	30.0	
63.5	670/800	3,167	2,122	2,534	24.86	32.4	
75	670/800	4,418	2,960	3,534	34.68	43.5	

- Germania: Z-20.1-17 DYWIDAG Threadbar Anchor Y1050H Prestressing Steel
- × Austria: BMVIT-327.120/0053-IV/ST2/2011 DYWIDAG Threadbar Anchor Y1050H Prestressing Steel
- △ Germania: Z-34.11-225 DYWIDAG GEWI® Bar
- Austria: BMVIT-327.120/0034-II/ST2/2005 DYWIDAG GEWI® Plus Threadbar

Fig.7.23 – Caratteristiche tiranti in barra a filettatura continua

Ad esempio, ipotizzando un interasse di 3,0 m, cui compete una sollecitazione da calcolo (per un coefficiente di sicurezza >1,3) di 108 kN/m, si avrà una sollecitazione sul singolo tirante di 324 kN.

Si potrà quindi, in base alle tabelle riportate nella pagina precedente, prescrivere barre Gewi Plus con diametro nominale di 28 mm e carico di snervamento 413 kN, utilizzando la voce di Prezziario corrispondente a barre da 45 t ovvero 450 kN.

Per quanto riguarda la testata dei tiranti, disponendoli in direzione esattamente perpendicolare all'estradosso inclinato del muro, si potranno utilizzare testate standard, con funzione di protezione della filettatura e del dado, eventualmente accoppiate a chiavi di bloccaggio progettate e modellate per unire alla resistenza meccanica una ragionevole valenza estetica.

L'utilizzo di chiavi come quelle più lunghe nell'immagine sottostante consentirebbe inoltre di distribuire in modo ottimizzato il carico puntiforme esercitato dalla testata della barra, eliminando la necessità di utilizzare putrelle che, non trattandosi di un muro moderno realizzato in calcestruzzo armato con trave interna, potrebbero rendersi necessarie per migliorare la distribuzione delle pressioni all'interfaccia testata-muro.



Fig.7.23 – Testata standard per barre a filettatura continua



Fig.7.24 – Caratteristiche tiranti in barra a filettatura continua

7.4.10 Lunghezza dei tiranti per il consolidamento del Muro della Palestra

Fermo restando il fatto che le barre dovranno essere ancorate nel substrato più profondo, occorre determinare la resistenza a taglio all'interfaccia malta-terreno, ed applicare quindi i coefficienti parziali previste dalle Norme Tecniche per le Costruzioni.

Nel sondaggio S2 visto in precedenza, alla profondità di 9,0 m, ovvero nel substrato, la prova nSPT ha restituito i valori 9-11-14, ovvero nSPT = 25.

Utilizzando i consueti diagrammi di Bustamante e Doix, per iniezioni semplici e nSPT = 25 troviamo un valore di resistenza al taglio lungo il bulbo di ancoraggio pari a 125 kPa.

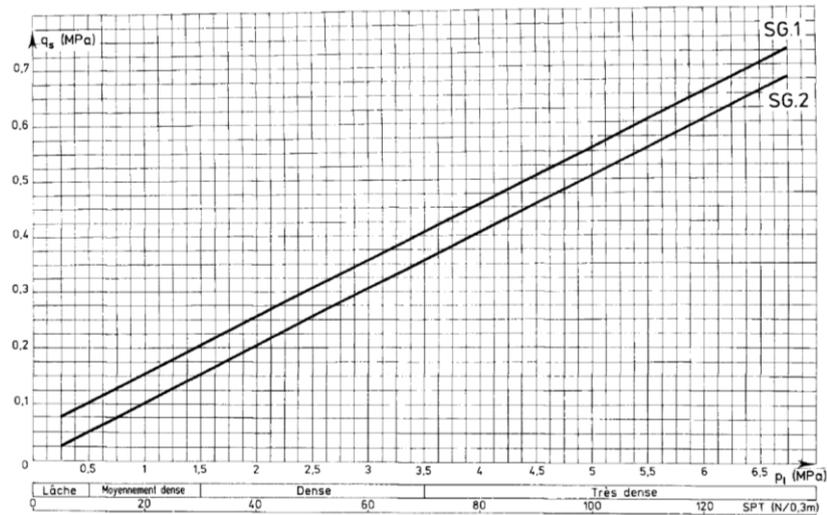


Fig. 16. — Abaques pour le calcul de q, pour les sables et graves.

Fig.7.25 – Grafico per calcolo Lunghezza infissione tirante - Bustamante e Doix

A un diametro di perforazione di 0,125 m corrisponde una circonferenza di 0,392 m, che porta ad una resistenza di $0,392 \text{ m} \times 1,0 \text{ m} \times 125 \text{ kPa} = 49 \text{ kN/m}$.

Applicando la Tab. 6.6.I - Coefficienti parziali per la resistenza degli ancoraggi delle NTC 2018 che richiede un coefficiente riduttivo pari a 1,2 e la Tab. 6.6.III - Fattori di correlazione per derivare la resistenza caratteristica dalle prove geotecniche, in funzione del numero n di profili di indagine che richiede un coefficiente riduttivo pari a 1,8, la resistenza di progetto per metro di bulbo scende a 22,6 kN/m.

Ne risulta una lunghezza del bulbo di ancoraggio paria 14,33 m (per sopportare il carico di progetto di 324 kN), valore accettabile ma che potrebbe essere dimezzato applicando al muro (col beneficio ulteriore di una miglior distribuzione delle sollecitazioni) una seconda fila di tiranti, sfalsata di mezzo interasse, ed ovviamente riducendo la sezione delle barre a filettatura continua utilizzate.

7.5 Analisi del versante antecedente a intervento riprofilatura

In ultimo, è stata eseguita una verifica del versante completo antecedentemente ai lavori di riprofilatura del versante.

Nell'immagine seguente è riportata la situazione a seguito dell'evento franoso



Fig.7.26 – Stato di fatto antecedente ai lavori di riprofilatura

7.5.1 Analisi completa con pendio senza la presenza di falda

Nell'immagine sottostante è riportata l'analisi di stabilità globale del pendio in assenza di falda. Il fattore di sicurezza minimo è pari a 1,36, quindi nel caso in cui il terreno non sia saturo, il versante risulta essere stabile.

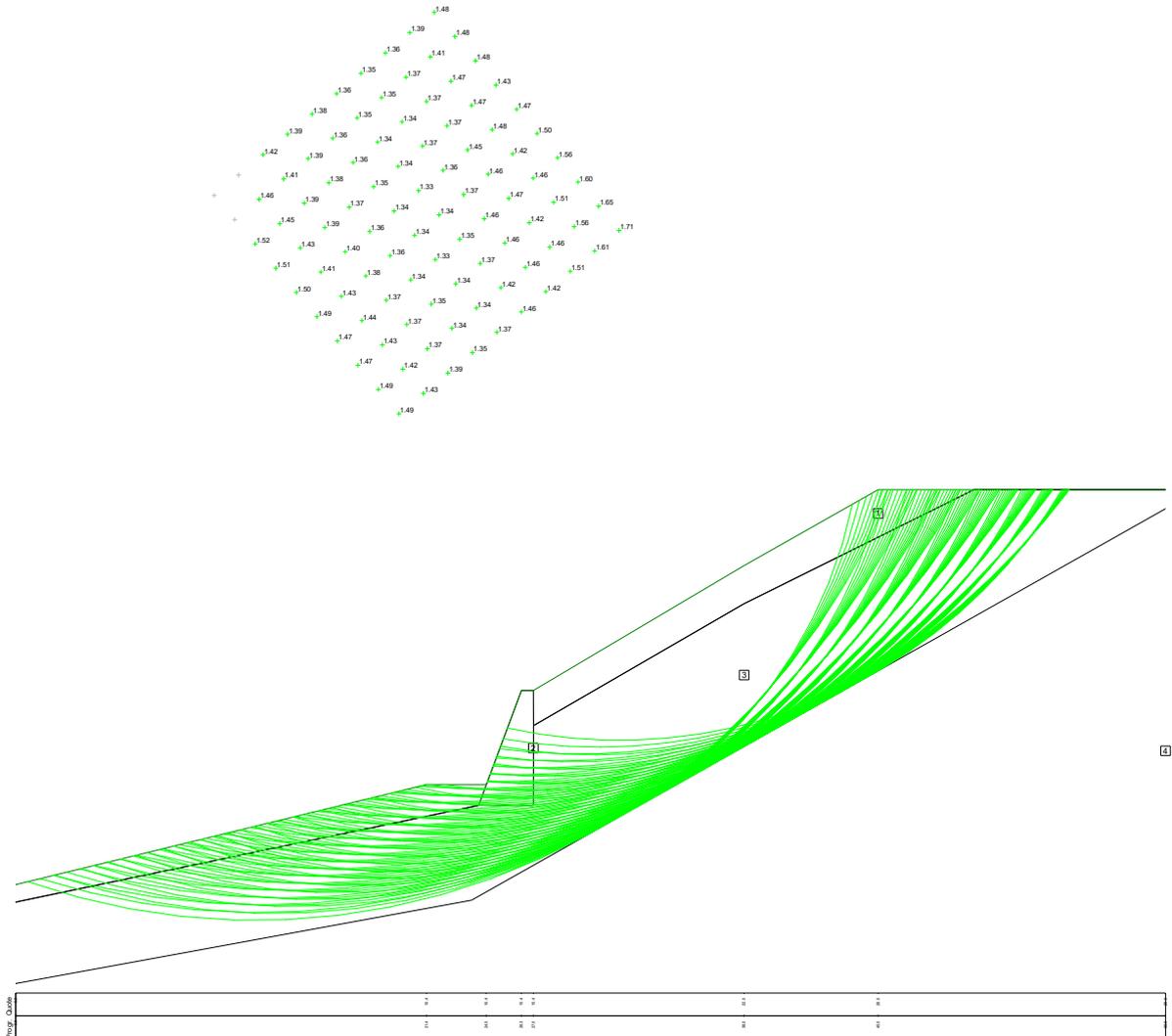


Fig.7.27 – Analisi di stabilità senza la presenza di acqua

7.5.2 Analisi completa con pendio con la presenza di falda e sovraccarico

Nell'immagine sottostante è riportata l'analisi di stabilità globale del pendio in presenza di falda con la presenza del sovraccarico dovuto alla presenza del nucleo ascensore.

Il fattore di sicurezza minimo è pari a 1,09.

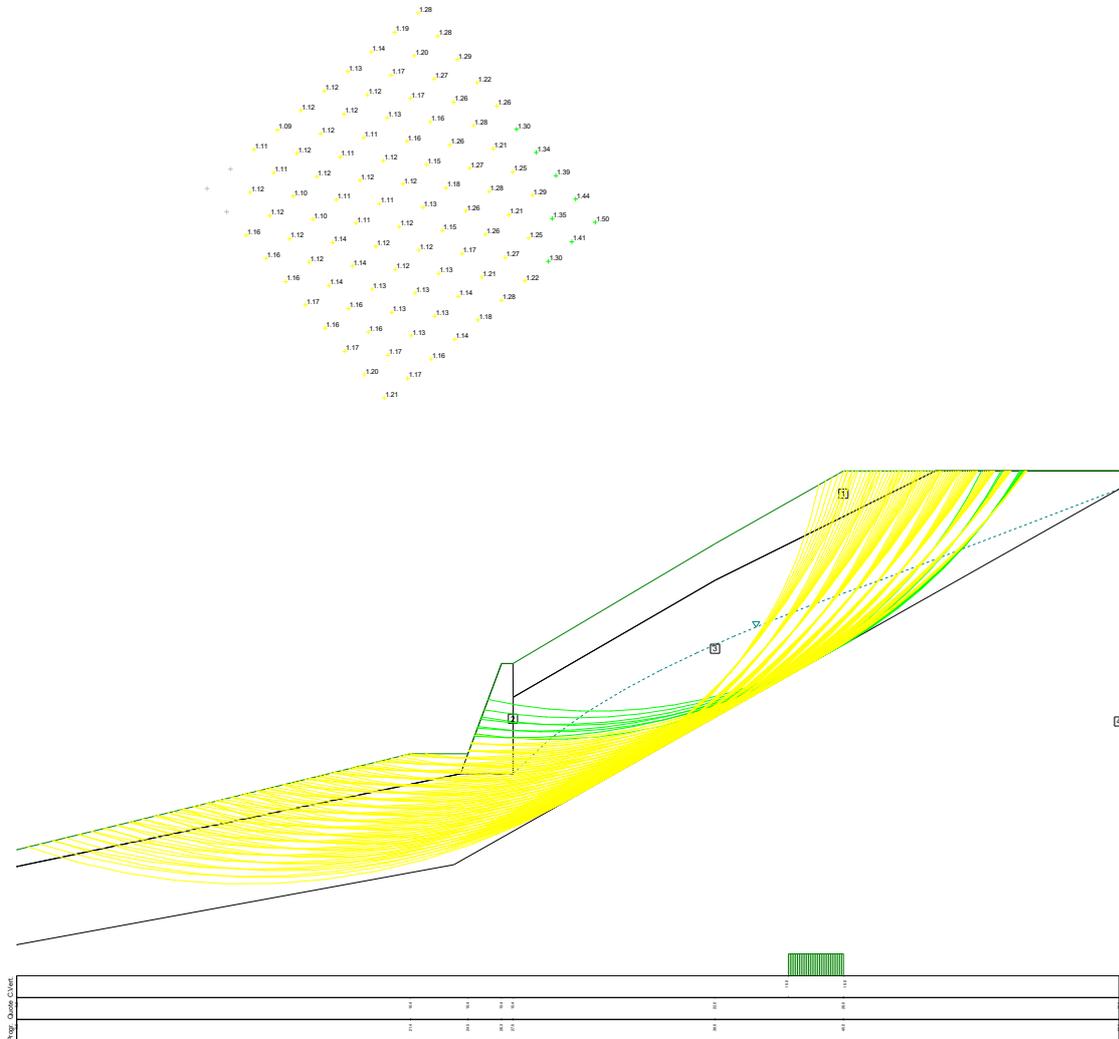


Fig.7.28 – Analisi di stabilità con presenza di acqua

7.5.3 Analisi completa con pendio con la presenza di falda e sovraccarico

Nell'immagine sottostante è riportata l'analisi di stabilità globale del pendio in presenza alzata di 1,5 m in modo da ottenere un fattore di sicurezza pari a 1,00

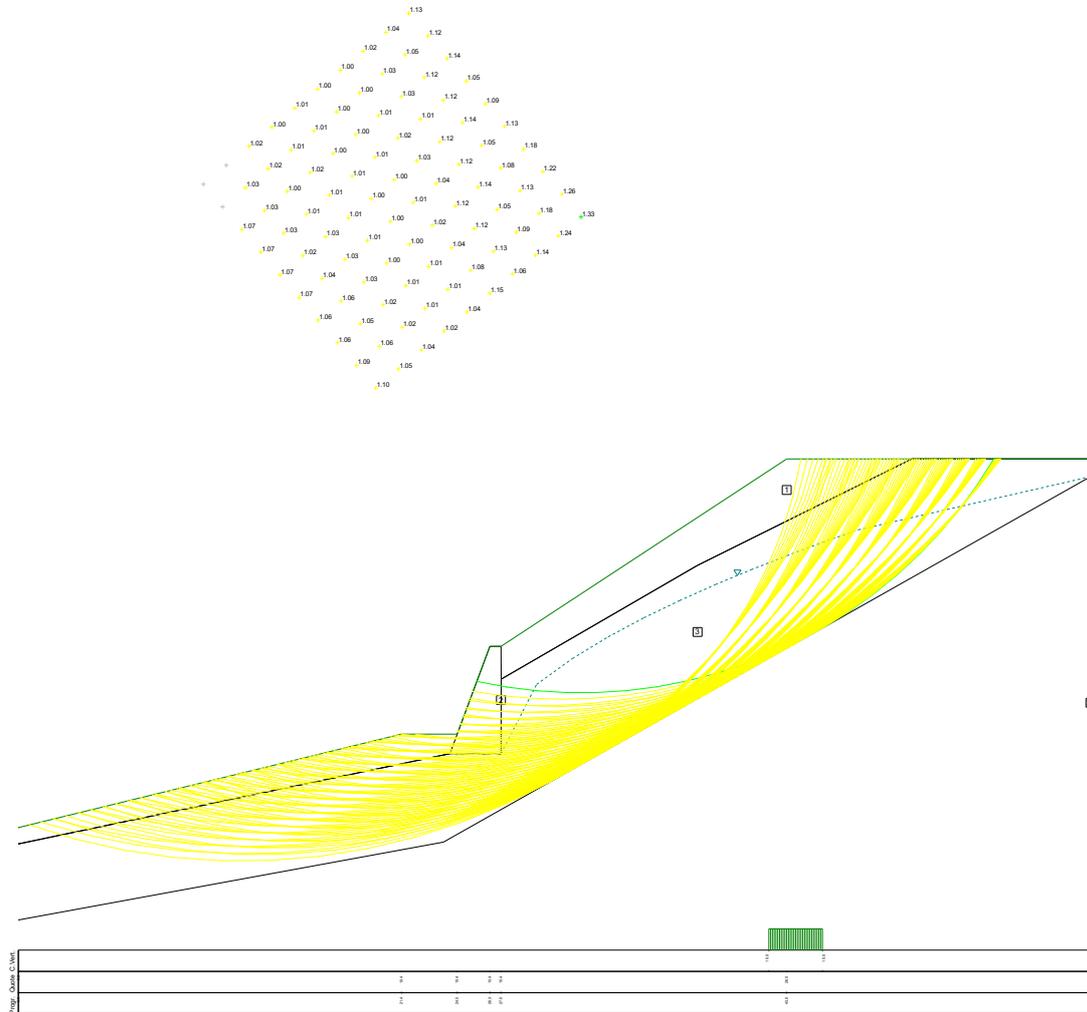


Fig.7.29 – Analisi di stabilità con presenza di acqua e sovraccarico

7.6 Analisi del versante successivo all'intervento di riprofilatura riprofilatura

In ultimo, è stata eseguita una verifica del versante completo antecedentemente ai lavori di riprofilatura del versante senza la presenza di falda.

Nell'immagine seguente è riportata la situazione a seguito dell'evento franoso

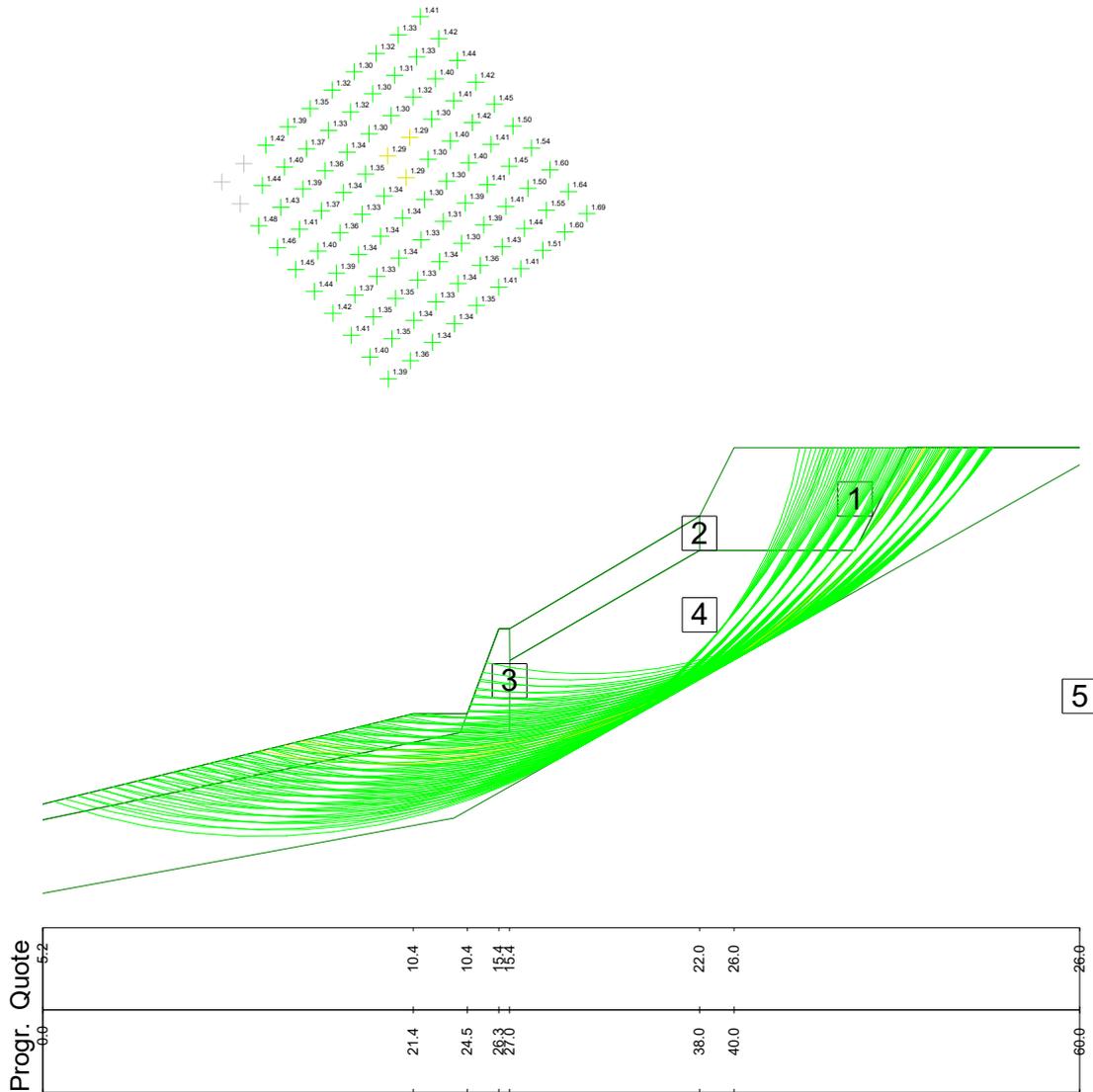


Fig. 7.30 – Analisi di stabilità senza la presenza di acqua

In ultimo, è stata eseguita una verifica del versante completo antecedentemente ai lavori di riprofilatura del versante con la presenza di falda e gli interventi di stabilizzazione del versante, dove è stata inserita la forza calcolata precedentemente dei tiranti

Nell'immagine alla pagina seguente (Fig. 7.31) è riportata la situazione a seguito dell'evento franoso.

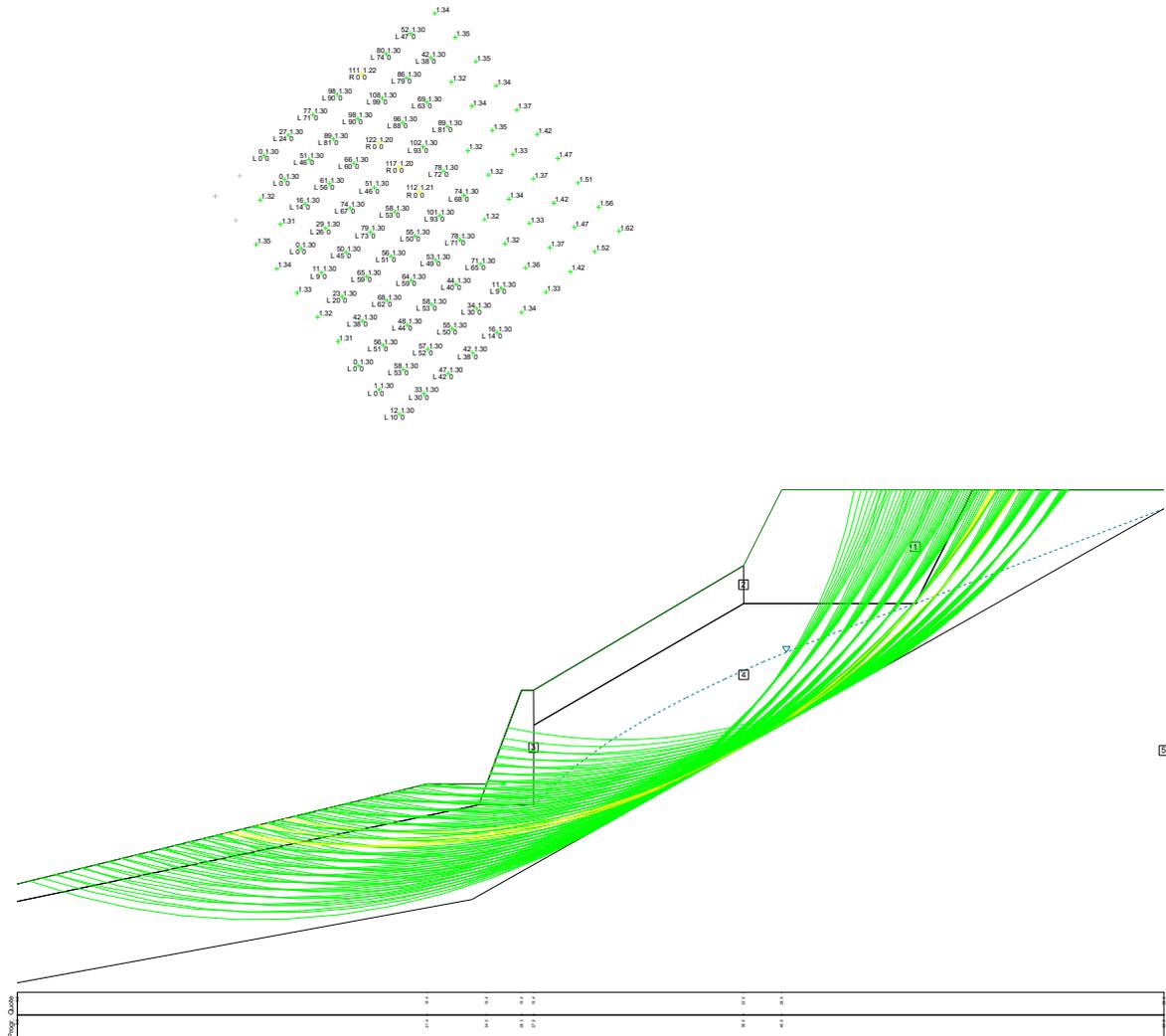


Fig. 7.31 – Analisi di stabilità con la presenza di acqua e sovraccarico

Le superfici di scivolamento sono state disposte in modo tale da essere tangenti al substrato di buona qualità, per non ottenere coefficienti di sicurezza elevati ma in realtà artefatti dovuti all'attraversamento, matematicamente possibile ma fisicamente non congruente con il reale comportamento del terreno, del substrato resistente da parte di piccole porzioni delle superfici di scivolamento circolari.

È stata quindi calcolata la resistenza a taglio puro dei pali di sottofondazione della soletta in calcestruzzo sulla quale poggia il rilevato in terra rinforzata.

Il valore di tale resistenza a taglio è stato ottenuto con la formulazione semplificata che lo definisce pari alla resistenza a trazione/compressione divisa per $\sqrt{3}$.

L'acciaio normalmente utilizzato per i micropali ha qualità S355, con una tensione ultima di rottura pari a $0,43 \text{ kN/mm}^2$. Avendo i tubi utilizzati diametro esterno 139,7 mm e spessore 8 mm, la superficie è di 3310 mm^2 , con una resistenza a trazione/compressione di 1 423 kN.

Dividendo tale valore per l'interasse di 3 m e per il coefficiente $\sqrt{3}$ la resistenza a taglio per metro lineare diventa di 273 kN per metro di struttura.

Tale valore è di gran lunga sufficiente a portare il valore del coefficiente di sicurezza da 1,20 a 1,30.

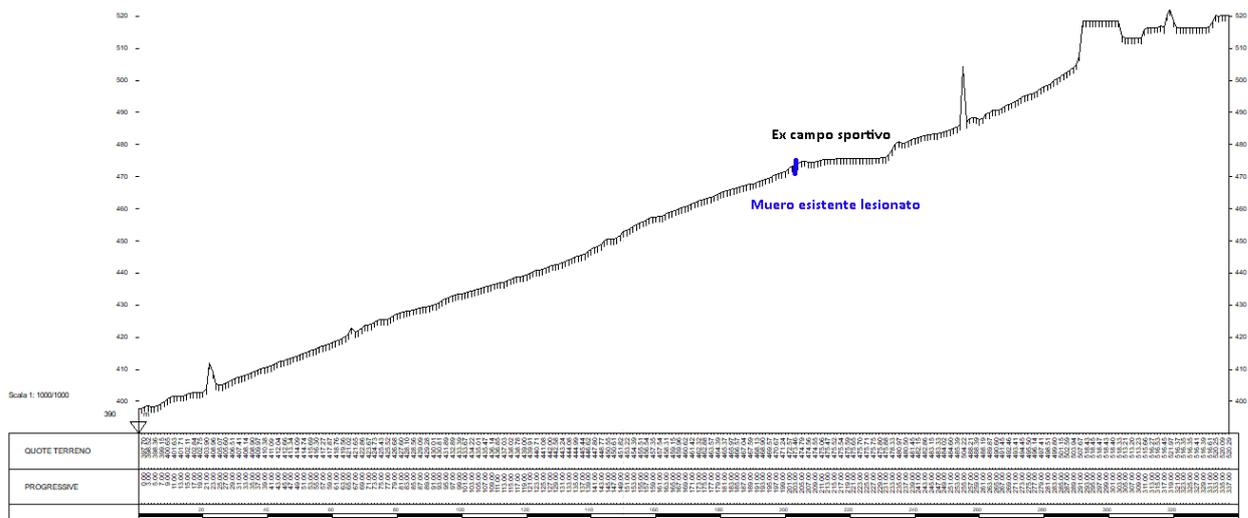


Fig.8.3 – Sezione di studio con opere di sostegno

Nella analisi di stabilità completa è stata simulata la presenza di una falda utilizzando come punti della stessa i valori ricavati dalle discontinuità delle stese sismiche, così come indicati nell'immagine sottostante.

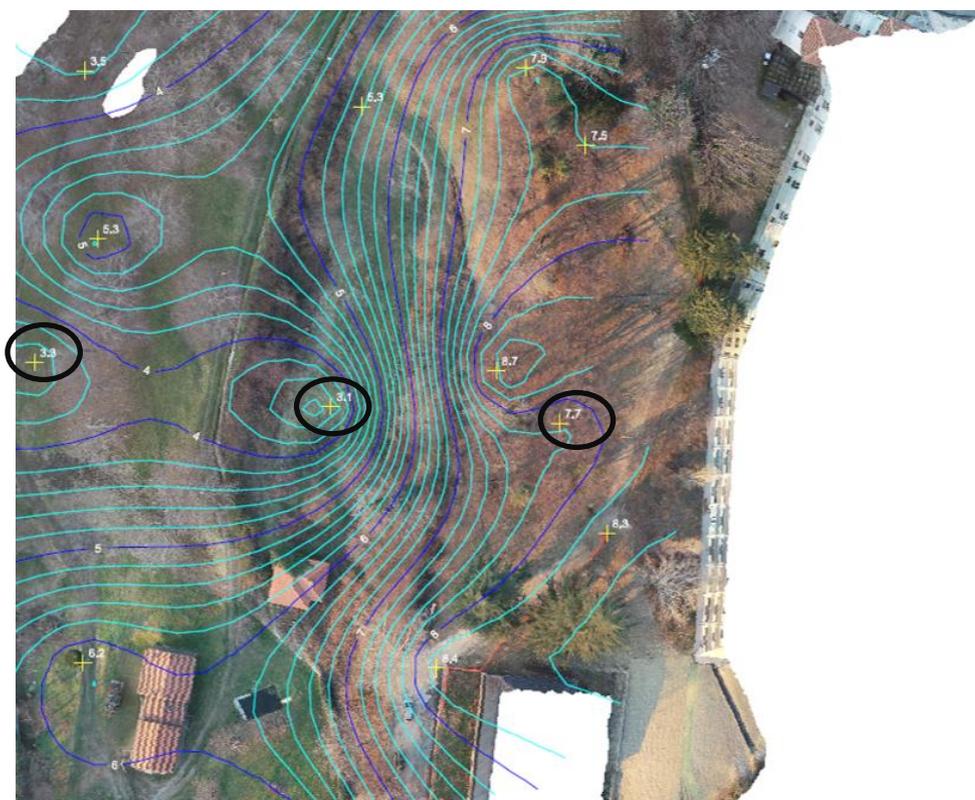


Fig.8.4 – estratto delle isoipse della superficie di discontinuità per ipotizzare il livello falda

Nell'immagine seguente è riportata l'analisi di stabilità dell'intero versante.

Poiché in questo caso le conoscenze geotecniche del sottosuolo sono meno approfondite rispetto all'area in cui si è attivato il movimento franoso, è stato utilizzato il materiale con le proprietà geomeccaniche meno vantaggiose in modo da avere un'analisi a favore di sicurezza.

$\phi = 26^\circ$ e $\gamma' = 20 \text{ kN/m}^3$ e coesione nulla.

In questa simulazione il Fattore di Sicurezza del versante è pari a 1,03, evidenziando una possibile situazione critica che trova riscontro nelle letture degli inclinometri I1 e I2.

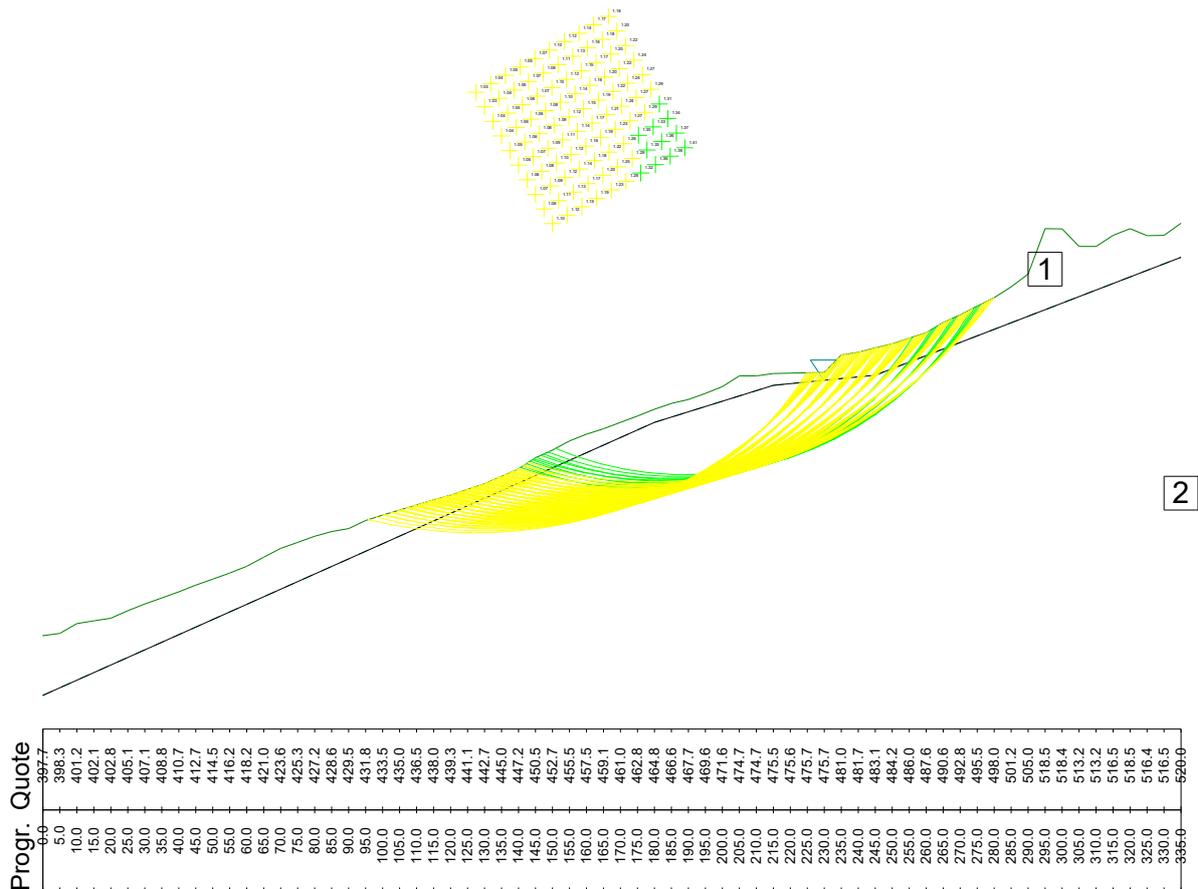


Fig. 8.5 – Analisi di stabilità

Nell'immagine 8.6 è stata calcolato l'effetto della presenza di un'eventuale opera di sostegno che possa contrastare il movimento riscontrato dagli inclinometri.

Il software utilizzato determina con una procedura iterativa la componente di forza orizzontale necessaria a raggiungere le condizioni di equilibrio limite qualora le caratteristiche geotecniche dei materiali coinvolti fossero inferiori a quelle misurate secondo un coefficiente riduttivo di progetto, in questo caso scelto pari al fattore di sicurezza che si intende conseguire, ovvero 1,3.

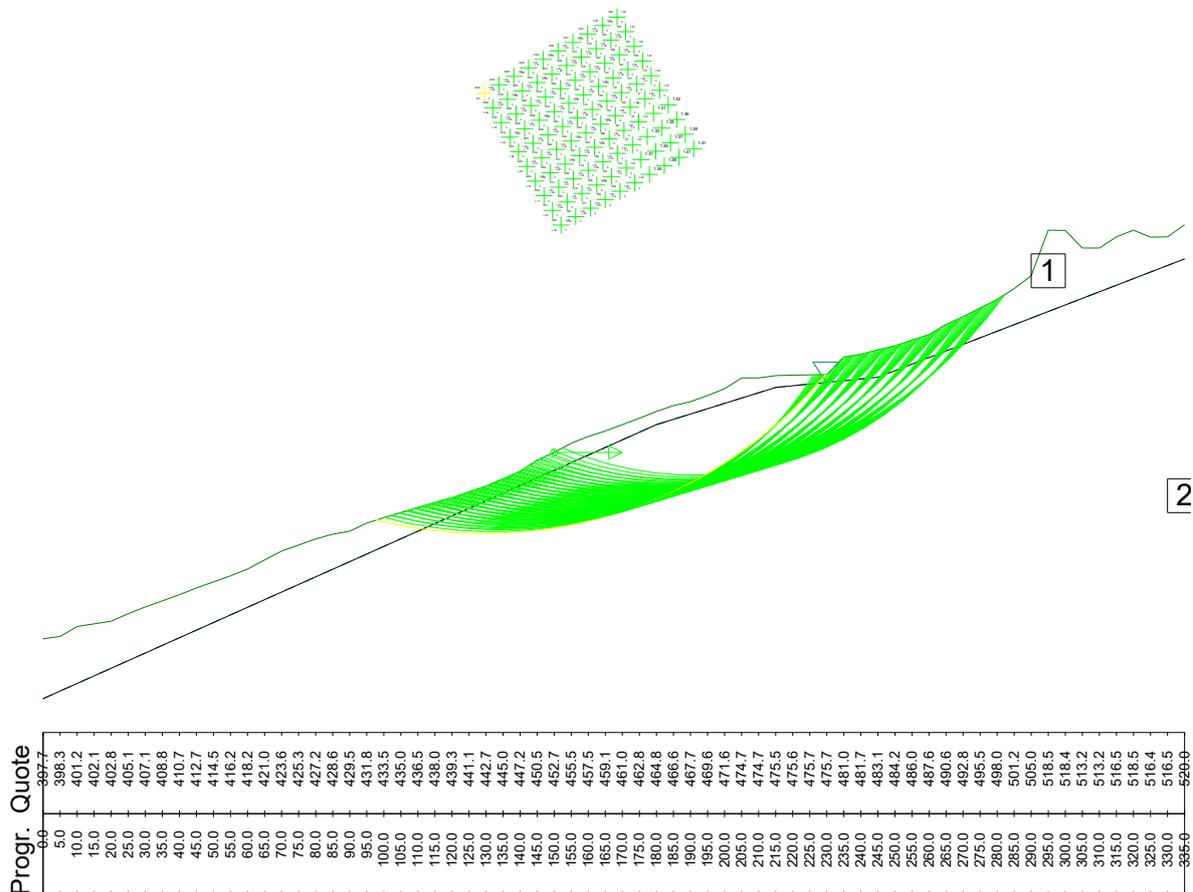


Fig. 8.6 – Analisi di stabilità con forza resistente

Si è cioè effettuata una ricerca automatica, in *back-analysis*, del valore delle sollecitazioni orizzontali che eventuali opere di stabilizzazione ed ancoraggio del muro dovranno complessivamente essere in grado di assorbire per garantire un coefficiente di sicurezza almeno pari a 1,3.

In questo caso la reazione delle opere di ancoraggio necessaria a ottenere il coefficiente di sicurezza richiesto è risultata pari a 2900 kN per metro lineare, grandezza che risulta difficile da ottenere con opere di contenimento ordinarie.

Nell'immagine sottostante è stato invece costruito un modello in cui non è presente alcuna opera di stabilizzazione, ma nel quale è stato invece ipotizzato un abbassamento della falda pari a 10 m, che potrebbe essere ottenuto con la messa in opera di appositi elementi drenanti.

In questo caso il Fattore di Sicurezza è risultato pari a 1,44.

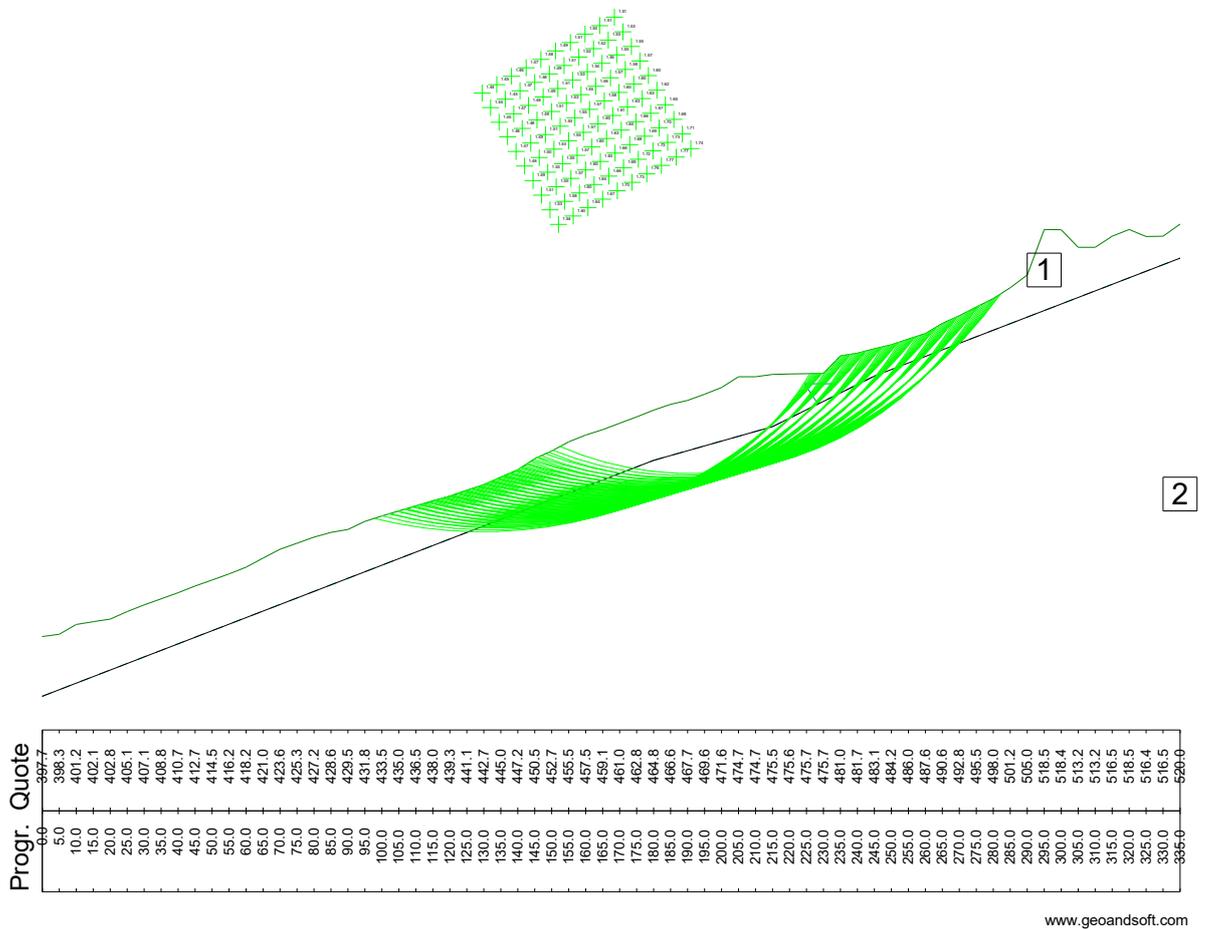


Fig.8.6– Analisi di stabilità con drenaggio (livello dell'acqua abbassato)

9 Conclusioni

Il fine ideale del percorso seguito nella redazione di questa Tesi è stato quello di descrivere e analizzare una situazione di instabilità reale e, in una seconda fase, quello di dimensionare opere finalizzate al ripristino statico del versante ed al contempo alla ricostruzione di una conformazione morfologica assimilabile a quella originaria.

Nella prima sezione si è studiata ed analizzata la morfologia e la topografia del luogo, tramite diverse metodologie di acquisizione dati (elaborati cartografici pubblicamente disponibili, Modello Digitale del Terreno (DTM) fornito dalla Regione Piemonte, rilievo topografico eseguito con strumentazione di terra associato all'elaborazione di una specifica campagna aereofotogrammetrica a mezzo drone) e, successivamente, sono stati confrontati tra loro i dati geotecnici reperiti da diverse fonti, quali sondaggi a carotaggio continuo terebrati nelle diverse fasi di sviluppo della progettazione, prove penetrometriche e misure inclinometriche rilevate.

Nella seconda sezione sono state dimensionate le opere, in parte già realizzate, per il ripristino delle condizioni di sicurezza del versante, in modo da rendere di nuovo fruibile alla comunità una zona di pregio storico e ambientale tale da far sì che il luogo su cui si sono realizzati gli interventi sia soggetto a vincolo paesaggistico e storico.

Nel futuro prossimo sono previsti ulteriori interventi tali da creare un'infrastruttura pedonale che renda possibile alla popolazione il passaggio dal centro storico di Mondovì al parco posto sulla riva del versante.

Nello studio è stato ovviamente di particolare interesse sviluppare il capitolo riguardante il rilievo topografico ottenuto con procedure semi-automatiche dall'analisi delle immagini aereofotogrammetriche riprese da un drone professionale dotato di GPS.

Ciò ha permesso di affrontare aspetti di calcolo e problematiche numeriche che difficilmente si ha occasione di incontrare durante il percorso formativo di uno studente universitario.

Un aspetto particolarmente ostico nell'affrontare problematiche geotecniche di tale ampiezza è la raccolta e l'assemblaggio di tutte indagini geognostiche disponibili da una serie di fonti estremamente eterogenea: vecchi sondaggi raccolti e resi disponibile da ARPA Piemonte, indagini geognostiche eseguite in fase di accertamento delle possibili responsabilità per l'evento franoso verificatosi, prove in sito ed indagini geofisiche commissionate nel corso delle diverse fasi della progettazione.

Le indagini, inoltre, per la maggior parte delle volte identificano valori puntuali che forniscono informazioni estremamente precise nella specifica posizione in cui è stata eseguita la prova ma non consentono correlazioni immediatamente estendibili all'intorno delle esatte posizioni delle prove.

Per questo motivo si è cercato di raccogliere il maggior numero possibile di informazioni, così da minimizzare il conseguente *bias* nell'elaborazione delle analisi numeriche.

La modellazione numerica ha il pregio di consentire la simulazione di casi estremi che potranno difficilmente verificarsi in natura, ad esempio l'applicazione di cambiamenti radicali nel posizionamento del livello dell'acqua all'interno del terreno pari al piano campagna.

In tal modo è però possibile acquisire una buona dimestichezza con il concetto di *sensibilità*, dal momento che analisi parametriche anche estreme consentono di identificare con maggior sicurezza l'insieme di caratteristiche fisiche e meccaniche che maggiormente influisce sul risultato finale del calcolo, primo risultato, in tal senso, l'identificazione (come prevedibile) dell'acqua come causa principe nel raggiungimento e superamento delle condizioni di equilibrio limite.

In questa Tesi si è quindi cercato di studiare il più approfonditamente possibile le problematiche tecniche e scientifiche che devono essere affrontate nel momento in cui un progettista si trovi a trattare un caso realmente complesso di stabilità di versanti, salvo poi doversi confrontare con aspetti di tipo economico e finanziario che, ovviamente, esulano dalle finalità di questo documento.

10 Bibliografia

- [1] Progetto delle opere per la messa in sicurezza di Via E. Tortora – Dissesto versante nord-ovest della collina di Piazza IV Novembre avvenuto in data 29/12/2017
- [2] RIPRESA AEREA ICE 2009-2011 - DTM 5
https://www.sciamlab.com/opendatahub/it/dataset/r_piemon_www-geoportale-piemonte-it-r_piemon-224de2ac-023e-441c-9ae0-ea493b217a8e
- [3] La Nuova Procedura per la Richiesta dei Dati Lidar e/o Interferometrici PS
<http://www.pcn.minambiente.it/mattm/procedura-richiesta-dati-lidar-e-interferometrici-ps/>
- [4] Differenza tra DTM DSM e DEM: <https://3dmetrica.it/>
- [5] Arpa Piemonte - Banca Dati Geotecnica - Sondaggi geognostici e campioni di terreno <https://webgis.arpa.piemonte.it/geoportale>
- [6] M. Corrao e G. Coco. “Geofisica Applicata. Con particolare riferimento alle prospezioni sismiche, elettriche, elettromagnetiche e geotermiche”
- [7] Marco Barla, 2018, Studio e analisi dell’evento franoso del 29/12/2017 che ha interessato l’istituto alberghiero “G. Giolitti” in Mondovì P.zza IV Novembre
- [8] F. Cestari 1990 Prove geotecniche in sito. Geo-Graph
- [9] Dov Leshchinsky, 2002, Stability of geosynthetic reinforced soil structures
- [10] Sarma S. K., 1973, Stability analysis of embankments and slopes
- [11] F. Pergalani, 1989 Gruppo informatica applicata alle scienze della terra, Atti primo workshop su Informatica e Scienza della Terra “*Stabilità dei versanti: verifica del grado di sicurezza in condizioni statiche e pseudostatiche*”
- [12] D.Lowe , Introduction to SIFT (Scale Invariant Feature Transform SIFT stands for Scale-Invariant Feature Transform), 2004, University of British Columbia

11 Appendice

11.1 Principi dell'interpretazione automatica delle foto aeree – Modello SIFT

Il trattamento automatizzato di ampi *set* di foto aeree, si parla di diverse centinaia di immagini ad alta risoluzione, risulta cruciale per l'ottimizzazione del lavoro di fotointerpretazione.

Trattandosi di tecniche piuttosto innovative può sicuramente valer la pena di approfondirne i principali aspetti teorici.

In estrema sintesi l'elaborazione si articola in quattro fasi successive, ognuna caratterizzata da una specifica esigenza teorica, e a ciascuna delle quali possono essere associati algoritmi informatizzabili o semplicemente procedure eseguibili anche manualmente:

- identificazione, all'interno delle varie fotografie, di punti ripresi da molteplici diverse posizioni della fotocamera;
- calcolo della posizione di ciascuno dei punti rispetto ad un sistema di riferimento arbitrario;
- collegamento dei punti fino a formare un reticolo di maglie triangolari che ricopre completamente l'area rilevata;
- applicazione ad ogni maglia triangolare della porzione di un fotogramma che gli corrisponde, dopo aver applicato le opportune trasformazioni geometriche atte a garantire la copertura corretta della maglia triangolare con un'immagine triangolare di forma differente, dovuta all'inclinazione del punto di ripresa rispetto alla normale della superficie.

Riconoscimento dei punti comuni tra le immagini fotografiche

Questa operazione, estremamente semplice per un operatore umano, è particolarmente difficile da affidare a procedure completamente automatizzate.

L'essere umano analizza le immagini partendo da un'analisi semantica con la quale può identificare il significato di un insieme di punti, ovvero riconoscere l'oggetto rappresentato, per approfondire poi l'osservazione riconoscendo anche i dettagli di tale oggetto, in modo pressoché indipendente dalla posizione, dalla scala e dall'orientamento.

In tal modo *l'occhio sinistro del cavallo baio* viene immediatamente abbinato ad una precisa posizione all'interno di ciascuna immagine che lo contiene grazie ad una ricostruzione che procede per interpretazione concettuale e non per mera analisi di *pattern* ovvero di schemi cromatici.

Una svolta decisiva è stato lo sviluppo da parte del professor David G. Lowe, docente di *Computer Science* alla *University of British Columbia* ed alla *New York University*, di un algoritmo che consente di trovare e descrivere caratteristiche locali (chiamate *features* nelle sue pubblicazioni) all'interno delle immagini digitali, chiamato *Scale-invariant feature transform* o più comunemente *SIFT*.

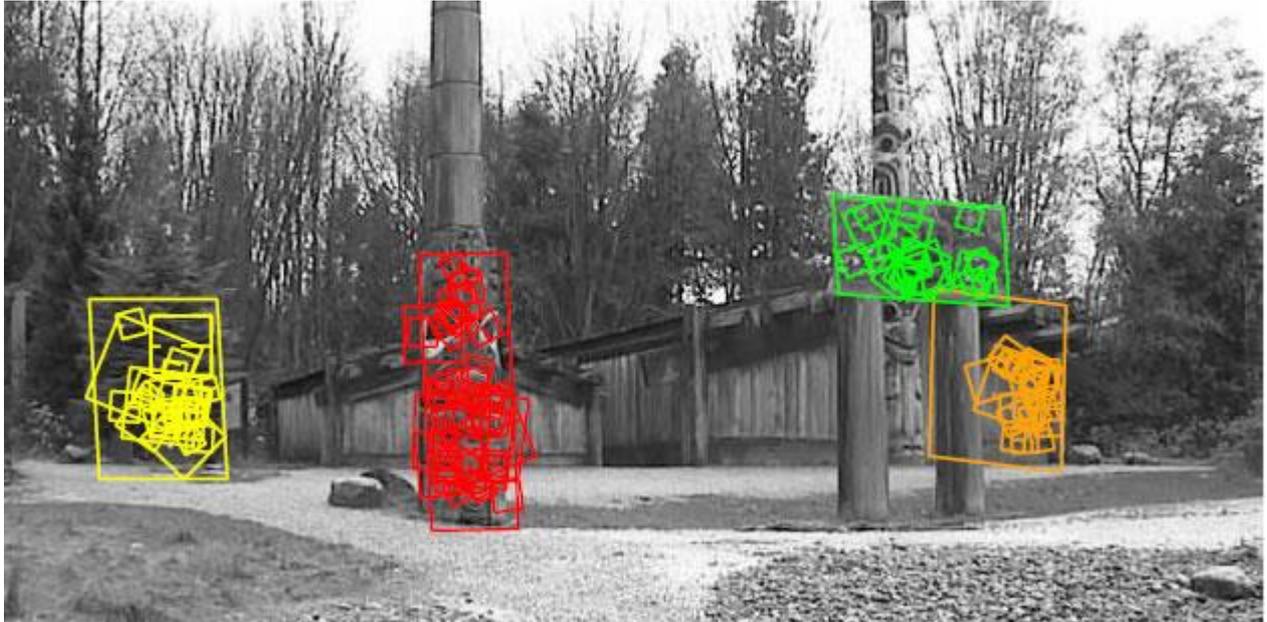
Tale algoritmo è stato pubblicato dal professor Lowe nel 1999 (le immagini che seguono sono tratte dall'articolo originale) ed ha consentito, unitamente al progressivo incremento della capacità computazionale degli elaboratori elettronici, una vera rivoluzione nel settore della *computer vision*.



La principale caratteristica di *SIFT* è di essere in grado di effettuare trasformazioni delle *feature* tali da renderle invarianti non solo rispetto alle variazioni di scala come anticipato dal nome stesso dell'algoritmo, ma anche alla rotazione, alle condizioni di illuminazione ed alla posizione del punto di vista, rendendo così le *feature* riconoscibili, come applicazione particolare alle esigenze di collimazione topografica trattate in questa sede, quando inquadrare in fotografie diverse da distanze ed angolazioni differenti.

Le quattro immagini a fianco sono esempi di *feature* che dovranno essere ricercate in una immagine in cui esse compaiono contemporaneamente, pur essendo state riprese da distanze, direzioni e angolazioni differenti, oltre ad essere state ruotate.

Nelle due immagini che seguono sono rappresentate la foto contenente le quattro *feature* e la stessa foto con evidenziati gli schemi identificativi.

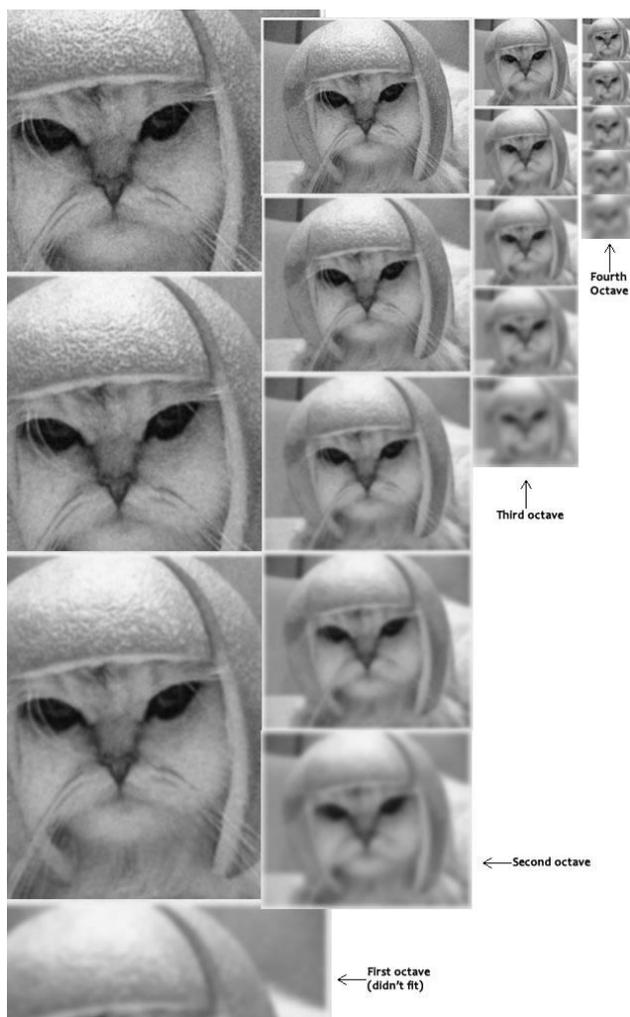


Come si vede l'accoppiamento delle immagini appare veramente *robusto*.

I rettangoli più grandi identificano le immagini riconosciute, mentre i rettangoli più piccoli sono destinati a segnalare *feature* individuali all'interno di tali aree.

Si può osservare come i rettangoli grandi siano deformati: questo perché essi seguono l'orientamento e la prospettiva degli oggetti all'interno della scena.

Il primo passo consiste nel creare una rappresentazione interna dell'immagine originale per assicurare l'invarianza di scala.



Tale procedura consiste nella costruzione di *scale space*, attraverso una duplice procedura di *sfocatura* progressiva e di *ridimensionamento* delle immagini dimezzandone ripetutamente la misura (per analogia col mondo della musica Lowe chiama *ottava* ogni serie di immagini via via dimezzate).

Nello *scale space* della foto del gatto l'immagine è di dimensioni decrescenti spostandosi verso destra, e sempre meno dettagliata, grazie al processo di sfocatura, spostandosi invece verso il basso.

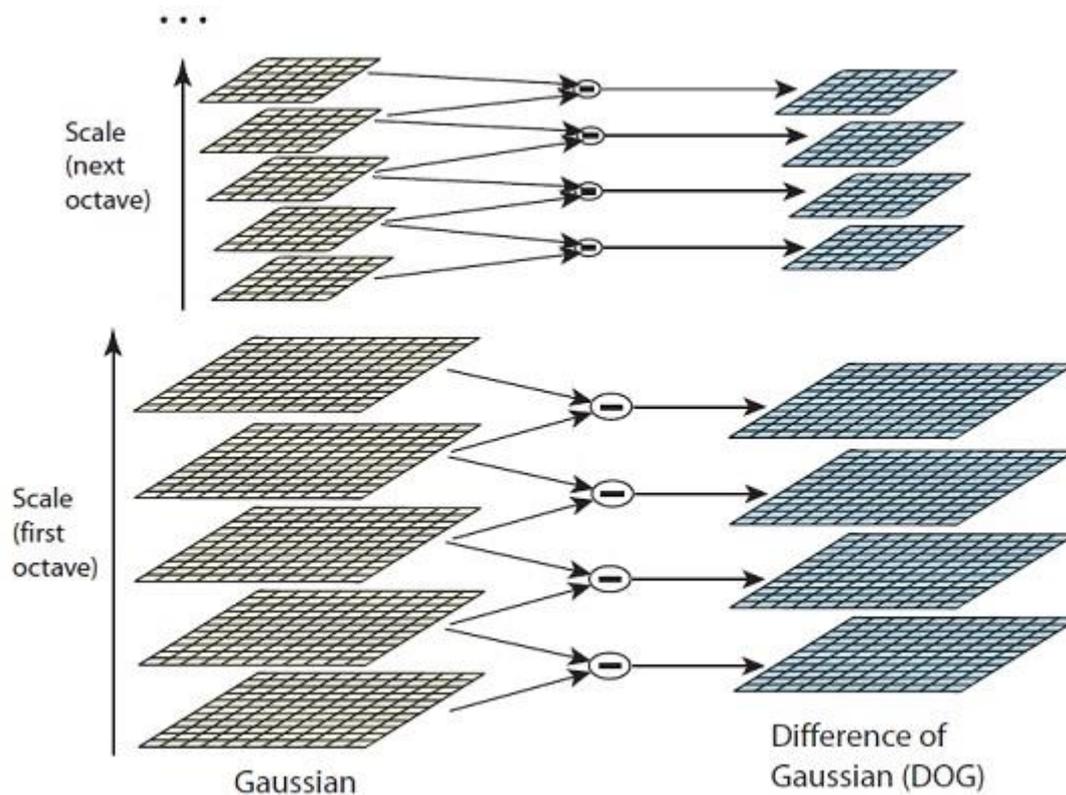
Si noti che il processo di sfocatura avvenga tramite la convoluzione di un operatore Gaussiano con l'immagine, in altre parole ogni punto dell'*immagine-destinazione* viene calcolato come media pesata dei valori dell'*immagine-origine* circostanti il punto in esame, in cui i pesi sono dati da una distribuzione di tipo gaussiano bidimensionale.

Ne consegue che più stretta è la gaussiana, meno sfocata risulterà l'immagine, e viceversa.

Lo scopo finale di questa fase, in realtà, è la ricerca degli spigoli e degli angoli all'interno dell'immagine, ottimi candidati come punti-chiave per le elaborazioni successive.

Tale risultato si può ottenere applicando l'operatore Laplaciano direttamente all'immagine originale, ovvero calcolando la derivata seconda bidimensionale sull'intensità luminosa dell'immagine stessa, se non che tale calcolo è assai oneroso ed al tempo stesso sensibile al *rumore di fondo*, per cui, quasi paradossalmente, il risultato è assai migliore utilizzando le immagini sfocate che non quelle perfettamente definite, in cui i dettagli come le irregolarità del casco o i baffi del gatto introducono al termine dell'applicazione del Laplaciano elementi evidenti ma non significativi.

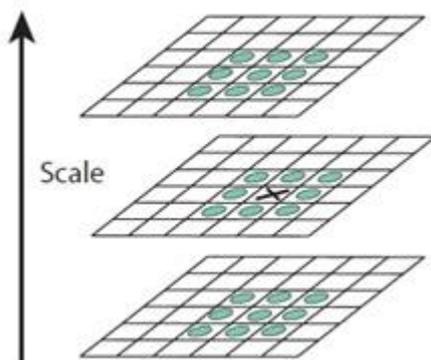
L'operazione LoG (*Laplacian of Gaussian*, come la chiama Lowe), come si diceva, è assai complessa, ma fortunatamente esiste una operazione assai più semplice, DoG (*Difference of Gaussian*), che consiste nel calcolare la differenza tra *feature* successive della stessa ottava.



Il principio per cui le due operazioni sono pressoché equivalenti come risultato finale, ma a un costo computazionale enormemente favorevole alla seconda, è che là dove il gradiente di luminosità è costante, e quindi la derivata seconda è trascurabile, l'operazione di sfocatura gaussiana non porta significative variazioni, mentre in corrispondenza di spigoli e angoli la sfocatura produce un effetto anche visivamente notevole, per cui la differenza tra due immagini successive evidenzia una distribuzione di massimi relativi in corrispondenza degli stessi punti in cui anche la derivata seconda della Gaussiana avrebbe espresso i valori più elevati.

Il risultato finale di questa fase è di l'ottenimento di un *DoG space*, che gli esperti di *computer vision* sanno dimostrare godere della proprietà dell'invarianza di scala.

Il passo successivo, immagine a fianco, consiste nell'esplorare il *DoG space* per trovare un punto di massimo o minimo relativo confrontando i 26 pixel circostanti quello in esame, considerando anche i LoG precedente e successivo all'interno della stessa *ottava*.



Il procedimento, ovviamente, va ripetuto per ogni punto e per ogni *ottava*, ricordando però che su ogni *scale* la prima e l'ultima immagine non saranno elaborate non avendo un'immagine precedente o una successiva.

Il processo prosegue perfezionando i posizionamenti dei massimi/minimi con sviluppi di Taylor, ed eliminando quindi i punti meno significativi per lo scarso contrasto,

quindi eliminando i punti allineati lungo gli spigoli per conservare solo quelli in corrispondenza degli spigoli, che sono i migliori punti-chiave per le elaborazioni successive.

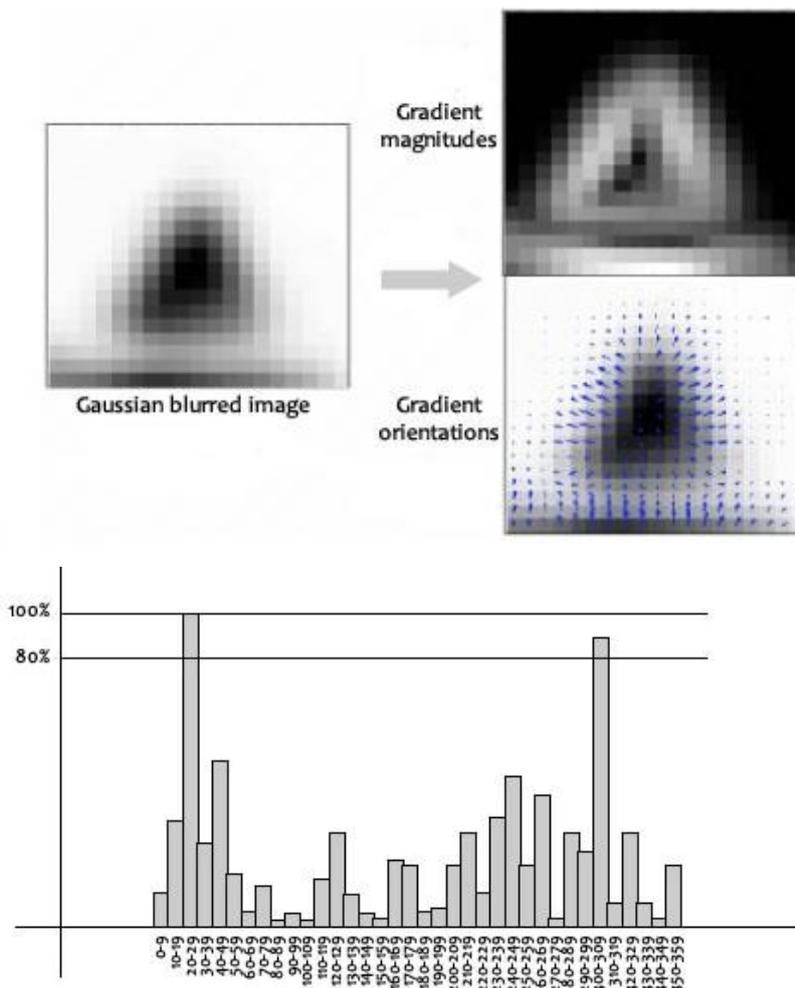
Questa operazione viene eseguita verificando che i gradienti siano elevati in due direzioni ortogonali: nelle regioni piatte i gradienti sono bassi in entrambe le direzioni, lungo gli spigoli sono alti perpendicolarmente agli spigoli stessi e bassi parallelamente ad essi, mentre in corrispondenza degli angoli sono elevati in entrambe le direzioni.

Matematicamente questo risultato si consegue tramite l'uso della Matrice Hessiana, riportata a fianco solo per evidenziare come questo livello di approfondimento trascenda gli scopi del presente capitolo, preferendosi focalizzare i concetti basilari su cui si basa l'impianto logico dell'algoritmo di Lowe.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}$$

Avendo a questo punto ridotto in modo significativo il numero di punti-chiave, dopo averli cioè selezionati accuratamente scegliendo solo quelli particolarmente affidabili e *robusti*, il passo successivo consiste nell'assegnare una orientazione a ciascun punto-chiave, così da garantirne anche l'invarianza rispetto alla rotazione.

Il penultimo passo consiste quindi nel costruire un istogramma delle direzioni del gradiente nei pixel presenti intorno ad un punto-chiave, avendo suddiviso il range azimutale in intervalli di 10°, ed incrementando ogni intervallo proporzionalmente alla magnitudine del gradiente del pixel che viene aggiunto.

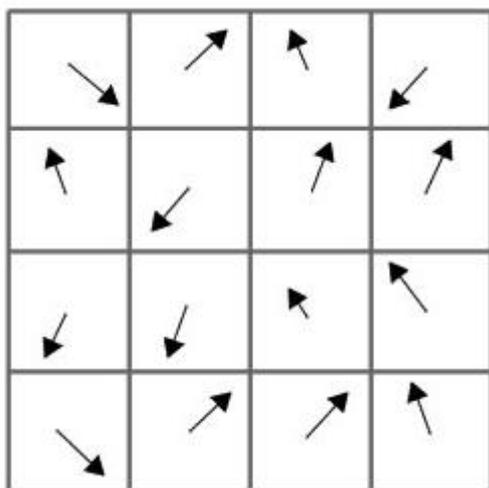
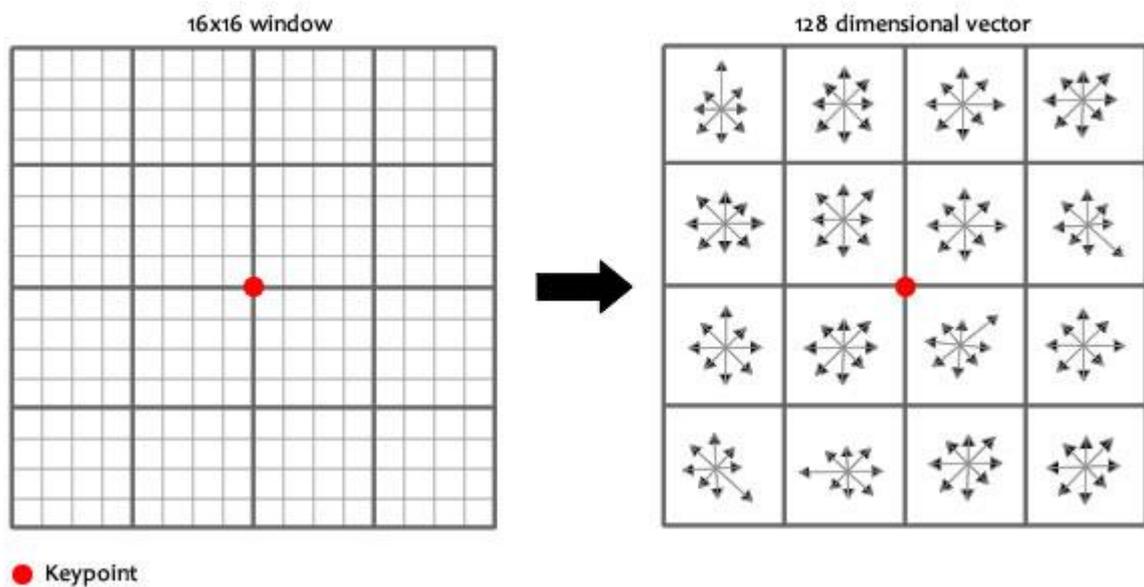


Posto uguale a 100% il massimo, in presenza di altre direzioni con valori superiori all'80% del massimo viene creato un nuovo punto-chiave per ciascuno di essi.

Il passo finale del SIFT consiste nel creare un *fingerprint* per ciascun punto-chiave, ovvero un'impronta unica che caratterizza e identifica in modo univoco ogni singolo punto-chiave.

I *fingerprint* devono essere piuttosto *tolleranti*, pur nella loro univocità, giacché le cose non sono mai *assolutamente identiche* quando elaborate a partire da immagini differenti.

Il sistema proposto consiste nel suddividere l'intorno di ciascun punto-chiave come nell'immagine seguente, ovvero in sedici quadrati di sedici celle, per ciascuna delle quali viene determinata la direzione del gradiente, ed assegnare a ciascun quadrato la direzione più ricorrente rispetto ad un istogramma azimutale di 8 intervalli di 45° ciascuno (per garantire una buona tolleranza all'errore nelle comparazioni successive).



A sinistra è riportato graficamente il *fingerprint* di un generico punto-chiave.

Sottraendo preliminarmente la rotazione del punto-chiave a tutte le rotazioni appena descritte, lo schema del *fingerprint* risulta invariante anche rispetto alla rotazione nello spazio delle *feature*.

Corre l'obbligo di ricordare che, essendo l'intero processo di elaborazione basato sulla sola intensità luminosa, le riprese aerofotogrammetriche devono essere effettuate nel più breve intervallo di tempo possibile, perché lo spostamento della sorgente luminosa, nel caso del rilievo topografico il Sole, cambia la distribuzione della luminosità e rende estremamente più difficoltosa l'analisi SIFT.

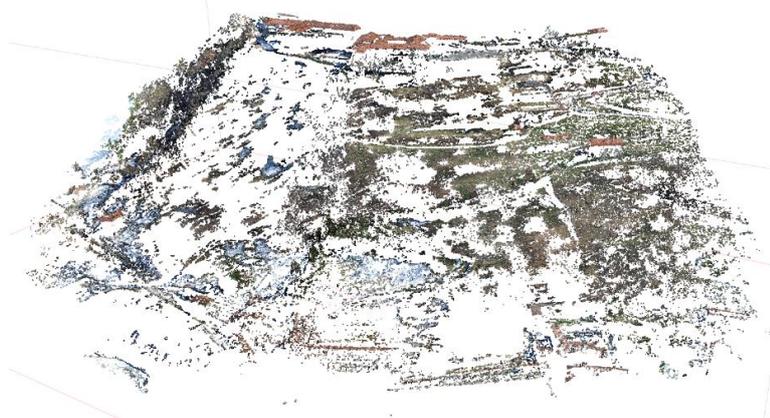
Va da sé che due immagini sono trattabili con SIFT in modo tanto più efficiente quanto minore è la distanza tra i due punti di ripresa, anche perché ammettendo una tolleranza sulla corrispondenza dei *fingerprint* dei punti-chiave è possibile conseguire il collegamento dello stesso punto anche quando ripreso da due posizioni distanti "A" e "C" tramite un punto di

ripresa intermedio “B”, con una logica di proprietà transitiva del tipo “se $A \approx B$ e $B \approx C$, allora $A \approx C$ ”.

In conclusione, il grado di tolleranza del *fingerprint* aumenta la possibilità di passare da un’ottava all’altra mantenendo la riconoscibilità dell’impronta, da cui l’invarianza di scala, la conservazione delle condizioni di illuminazione nel corso della sessione di riprese fotografiche, mantenendo la distribuzione di luci e ombre sulle superfici riprese, e grazie alla normalizzazione rispetto alla direzione principale della *feature*, assicura l’invarianza rispetto alla rotazione, l’invarianza rispetto al punto di vista è una combinazione delle due invarianze precedenti, ed infine la costanza dei rapporti luce/ombra permette di fare affidamento sull’invarianza anche rispetto all’illuminazione, fatta salva l’idea che bloccare l’esposizione per tutta la durata della sessione fotografica può essere un fattore di miglioramento del risultato ottenuto.

Applicativamente si può quindi procedere all’identificazione dei *punti-chiave* in ogni immagine fotografica, per poi confrontare i *fingerprint* dei punti appartenenti ad immagini diverse per determinare infine quali punti appaiano in immagini fotografiche differenti.

A fianco è presentato l’insieme dei *fingerprints* risultanti dalla prima fase di interpretazione del rilievo fotogrammetrico eseguito a valle dell’Alberghiero di Mondovì.



Ottimizzazione del posizionamento delle fotocamere

Trattandosi di rilievi aerofotogrammetrici l’apparecchiatura di ripresa

fotografica è in continuo movimento, il che non rende facile conoscere la posizione esatta del multicottero.

Vero è che i droni più avanzati sono dotati di GPS di qualità, bussola digitale, accelerometri a tre assi, giroscopi a sei assi ed altimetri barometrici, tuttavia la conoscenza dell’esatta posizione al momento dello scatto è tutt’altro che garantita.

Analiticamente è però possibile ottimizzare le coordinate dei punti di ripresa, azione che a sua volta permette di migliorare enormemente la qualità finale del rilievo.

I dati GPS e magnetometrici, essendo mediati su diverse centinaia di immagini, possono fornire un eccellente posizionamento del sistema di riferimento locale rispetto ad un sistema di riferimento assoluto, quali UTM o WGS 84.

Le posizioni rispetto al sistema locale sono invece una questione più delicata.

La risposta a questo problema è data principalmente dalla ridondanza dell’informazione, nel senso che i voli aerofotogrammetrici vengono pianificati in modo da avere sovrapposizioni sia nella direzione del moto sia lateralmente dell’ordine dell’80%, cosicché ogni punto del terreno ha modo di venir ripreso mediamente da venticinque posizioni differenti.

Questo approccio presenta un primo evidente vantaggio nell’ottica del SIFT illustrato nel capitolo precedente: spostamenti tanto ridotti tra punti di ripresa successivi consentono l’identificazione di un numero elevato di punti-base, in quanto la modesta distanza tra le

posizioni successive della fotocamera minimizzano le variazioni dei *fingerprints* e consentono un riconoscimento dei punti comuni più ampio ed affidabile.

La seconda motivazione di tanta ridondanza è legata a concetti matematici e statistici decisamente più tradizionali.

Si sa che per determinare il valore di n incognite è necessario scrivere almeno n equazioni, in quanto il sistema derivante da un numero di equazioni inferiori risulterebbe indeterminato.

Dovrebbe essere altrettanto noto che un sistema di m equazioni in n incognite, con $m > n$, risulta sovradeterminato, il che non è uno svantaggio perché in genere, quando si parla di misure nel mondo reale, queste sono affette da errori, ed è fortunatamente possibile trasformare il sistema in un sistema alle derivate parziali atto a determinare i risultati minimizzando gli errori, tipicamente con il metodo dei minimi quadrati.

Nelle elaborazioni fotogrammetriche sono sempre presenti errori, in particolare, come accennato, nel caso di voli in cui la fotocamera è continuamente in movimento.

Occorre quindi trovare un modo di avere più equazioni che incognite.

A titolo esemplificativo si può ipotizzare che la posizione della fotocamera ai punti di ripresa P_1, P_2, \dots, P_n siano ignote, così come le posizioni dei punti-chiave identificati da SIFT, che potremmo definire *target* e identificare con la notazione T_1, T_2, \dots, T_m .

Utilizzando i come indice tra 1 ed n dei punti di ripresa, e j come indice dei *target* tra 1 ed m , ed introducendo per comodità la variabile ausiliaria $D_{i,j}$ che indica la distanza tra la fotocamera i ed il *target* j , e nell'ipotesi che la direzione azimutale e zenitale in cui punta la fotocamera al momento dello scatto sia nota con certezza, per cui in base alla posizione dei *target* sui fotogrammi è possibile definire un insieme di versori $U_{i,j}$ rivolti dalla i -esima fotocamera al j -esimo *target*, si verificheranno le seguenti condizioni.

Il numero di incognite è pari a $3n + 3m + n \cdot m$, ovvero a tre coordinate per ogni fotocamera, altrettante per ogni *target*, e tante distanze D quante sono le possibili coppie (i,j) .

Automaticamente (per questo si è parlato di variabile ausiliaria) sono disponibili $n \cdot m$ equazioni, nella forma $D_{i,j} = |T_j - P_i|$, quindi le variabili *distanza* non incrementano la complessità del problema.

Per ogni *target* si possono scrivere $n - 1$ equazioni del tipo:

$$P_1 + U_{1,j} \cdot D_{1,j} = P_2 + U_{2,j} \cdot D_{2,j} = \dots = P_n + U_{n,j} \cdot D_{n,j} \quad (\text{sottintendendo cioè sempre } = T_j)$$

Si avranno quindi $(n - 1) \cdot m$ equazioni aggiuntive, che crescono geometricamente a differenza dalle incognite che crescono solo linearmente.

Ad esempio, con 4 punti di ripresa e 4 *target* le incognite sono $3 \cdot 4 + 3 \cdot 4 + 4 \cdot 4 = 40$, mentre le equazioni sono $(4 - 1) \cdot 4 + 4 \cdot 4 = 28$, quindi il sistema non è determinato.

Con 10 punti di ripresa e 10 *target*, invece, le incognite sono $3 \cdot 10 + 3 \cdot 10 + 10 \cdot 10 = 160$, mentre le equazioni sono $(10 - 1) \cdot 10 + 10 \cdot 10 = 190$, quindi il sistema è sovradeterminato e può perciò essere trattato in forma di minimizzazione dell'errore con un sistema ai minimi quadrati.

Assai interessante il fatto che, all'aumentare del numero di punti di ripresa che vedono contemporaneamente un elevato numero di *target*, la prima condizione ottenuta con la sovrapposizione dei fotogrammi, la seconda con l'identificazione tramite SIFT di un elevato numero di punti-chiave, è possibile trattare come incognite anche le direzioni azimutali e zenitali di puntamento della fotocamera, tanto le incognite sarebbero solo $5n + 5m + n \cdot m$, mantenendo la lenta crescita lineare all'aumentare del numero dei punti di ripresa.

Si vede bene che, siccome le misure della direzione della fotocamera non possono che essere affette da errore, sia pur minimo, le rette passanti per il centro ottico delle fotocamere e per i punti corrispondenti ai *target* identificati nei fotogrammi, giungendo da posizioni diverse, non si intersecheranno nello spazio tridimensionale, ma saranno solo “abbastanza vicine”, quindi gli algoritmi di minimizzazione potranno trattare in modo efficace l’ottimizzazione dei punti che in realtà, invece che *intersezioni*, saranno definiti come “*punto medio del segmento che congiunge i due punti alla minima distanza tra le due rette*”, risolvendo così anche il problema dell’incertezza geometrica del puntamento.

11.2 Interpretazione indagini sismiche

Descrizione metodologica della sismica a rifrazione

Come noto, la sismica a rifrazione utilizza le onde acustiche nei corpi solidi, utilizzando per l'energizzazione un martello percussore, una massa battente oppure una piccola carica esplosiva esplosivo.

Le onde sismiche (sonore) viaggiano nel sottosuolo a differente velocità a seconda dei litotipi attraversati e subiscono lungo le superfici di discontinuità geologica i fenomeni della riflessione, rifrazione e diffrazione.

Le superfici di confine degli strati geologici, caratterizzati da una differenza di velocità tra lo strato superiore (V_1) e lo strato ad esso sottostante (V_2), producono dei raggi rifratti che viaggeranno parallelamente alla superficie di discontinuità (con la stessa velocità dello strato "più veloce") rifrangendo continuamente verso l'alto (quindi verso lo strato "più lento") energia elastica.

Una delle condizioni principali per l'applicazione del metodo della sismica a rifrazione è che la velocità di propagazione delle onde sismiche aumenti con la profondità ($V_1 < V_2$). Un altro requisito indispensabile per il buon funzionamento di questa metodologia è che gli strati posseggano uno spessore sufficiente per essere rilevati; in caso contrario occorre aumentare il numero di geofoni e diminuirne la spaziatura.

L'energia rifratta che ritorna alla superficie viene misurata utilizzando dei geofoni.

Attraverso lo studio dei tempi di percorso e quindi delle velocità si può risalire alla disposizione geometrica ed alle caratteristiche meccanico-elastiche dei litotipi presenti nella zona di indagine.

È buona norma commisurare l'intensità dell'energizzazione alla lunghezza dello stendimento e, quando possibile utilizzare le opzioni di controllo automatico del guadagno. Diversamente i primi arrivi potrebbero essere difficili da riconoscere sia per l'eccessiva debolezza del segnale (geofoni lontani dal punto di scoppio) sia per la possibile saturazione dei geofoni più vicini.

Il comportamento sismico delle onde P

Le onde P sono anche chiamate Onde Primarie in quanto si propagano nel mezzo attraversato con maggiore velocità rispetto alle altre onde.

Nelle onde P, le particelle che costituiscono il mezzo attraversato vengono spostate nello stesso senso di propagazione dell'onda, in questo caso, in senso radiale. Quindi, il materiale si estende e si comprime con il propagarsi dell'onda.

Le onde P viaggiano attraverso il terreno in modo analogo a quello delle onde sonore attraverso l'aria.

La velocità con la quale le onde P si propagano in un mezzo dipende dalle proprietà fisiche (cioè rigidità, densità, saturazione) e dal grado di omogeneità del terreno.

Dalla sorgente di energizzazione viene emanato un "treno d'onde" i cui segnali saranno rilevati dalle stazioni riceventi ad intervalli di tempo dipendenti dalle caratteristiche elastiche del terreno. La registrazione grafica del treno d'onda in arrivo è chiamata "sismogramma".

I fronti d'onda possono essere superfici sferiche o di forma qualsiasi. Il principio di Huygens, basilare nello studio di qualsiasi perturbazione ondosa, stabilisce però che "in ogni istante,

qualsiasi punto di un fronte d'onda di forma qualsiasi può essere considerato come sorgente puntiforme di onde circolari (oppure sferiche se la perturbazione è in tre dimensioni)".

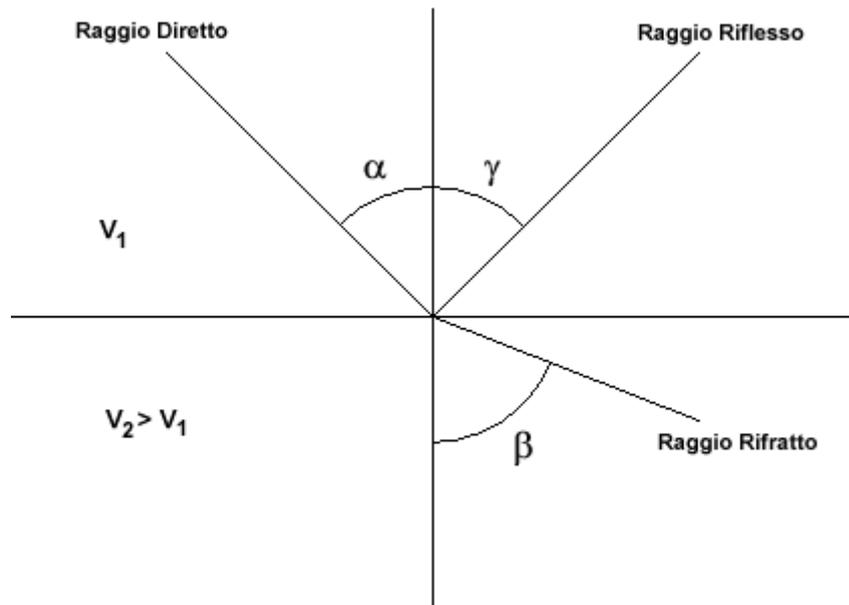
La propagazione di onde può quindi essere interpretata come una continua generazione di onde circolari che interferendo fra loro danno luogo a un'onda risultante osservabile macroscopicamente.

Le semirette normali ai fronti d'onda sono chiamate "raggi sismici" ed indicano la direzione di propagazione dell'onda elastica.

Per l'analisi dei dati ottenuti tramite la sismica a rifrazione, è usuale considerare sia le immagini delle onde sismiche sia i percorsi dei raggi sismici. Questi ultimi possono sostituire i fronti d'onda con buona approssimazione, permettendo di trattare soltanto i tempi di percorso delle onde elastiche e non tutte le altre grandezze tipiche di un fenomeno ondulatorio quali ampiezza, frequenza e fase.

Quando un raggio incontra un'eterogeneità sul percorso, per esempio un contatto litologico con un altro materiale, il raggio incidente si trasforma in diversi nuovi raggi. Gli angoli che il raggio incidente, i raggi riflessi ed i raggi rifratti formano con la normale alla superficie di contatto tra i due materiali sono legati fra loro ed alle velocità di propagazione da alcune relazioni note come "leggi di SNELL".

Le leggi di Snell affermano che il raggio incidente, riflesso e rifratto giacciono sullo stesso piano; inoltre valgono le seguenti relazioni tra gli angoli:



per la riflessione: $\alpha = \gamma$

per la rifrazione: $V_1 \cdot \sin \alpha = V_2 \cdot \sin \beta$

Esiste un particolare valore dell'angolo di incidenza, chiamato "angolo critico" o "angolo limite" (*ic*) particolarmente significativo per la sismologia di rifrazione. Si definisce infatti angolo critico l'angolo d'incidenza che rende $\beta=90^\circ$.

Se l'angolo di incidenza è uguale a 90° gradi l'onda rifratta, secondo la teoria di Huygens, si propaga lungo il contorno dello strato e funge da fonte per un nuovo fronte d'onda secondario

e per nuovi raggi. I percorsi dei raggi sismici escono con un angolo pari all'angolo critico. È possibile determinare l'angolo critico calcolando l'inverso del seno del valore della velocità del primo strato/velocità del secondo strato.

Se l'angolo di incidenza è maggiore dell'angolo limite, il fenomeno della rifrazione scompare e si ha riflessione totale senza propagazione dell'onda nel secondo strato.

Applicazioni

Le indagini di sismica a rifrazione vengono normalmente impiegate per le seguenti problematiche:

- Mappatura delle zone formate da materiale disgregato
- Ricerca della profondità della falda freatica
- Determinazione della resistenza allo scavo
- Mappatura della permeabilità di strati ghiaiosi
- Mappatura degli strati composti da materiale sciolto
- Localizzazione delle zone di frattura
- Mappatura del substrato roccioso

Problemi e limitazioni della sismica a rifrazione

- Le velocità sismiche dei terreni interessati dall'indagine devono crescere con la profondità
- Gli strati debbono possedere uno spessore sufficiente per essere rilevati
- Rilievi eseguiti su terreni di riporto o in aree adibite a discariche e in presenza di forte rumore antropico conducono spesso a risultati non affidabili
- Fratture singole e strette spesso non possono essere identificate.

Interpretazione dei risultati

Gli strumenti capaci di registrare movimenti nel terreno sono detti sismometri o geofoni. Essi saranno necessariamente posti sulla superficie del terreno.

Solitamente, si hanno sismogrammi di diversi geofoni, posti a diversa distanza dalla sorgente: questi possono essere stampati in funzione del tempo e della distanza, in quelle che vengono definite "registrazioni di scoppio" (*shot records*). La variazione Tempo/Distanza è detta "scostamento" (*moveout*).

Arrivi con ampio scostamento sono fortemente inclinati nella registrazione di scoppio e viceversa; dalle registrazioni di scoppio è quindi possibile distinguere l'arrivo delle diverse onde sismiche (dirette, riflesse, rifratte).

A piccole distanze (offset) il primo arrivo è delle onde dirette: questo arrivo ha grande ampiezza e lo scostamento è costante a tutte le distanze.

A maggiori distanze il primo arrivo comincia ad essere quello dell'onda rifratta. Questo arrivo è caratterizzato da piccola ampiezza d'onda e da scostamento costante ma minore di quello dell'onda diretta.

L'ultimo arrivo ad ogni geofono è quello dell'onda riflessa: il suo scostamento tende ad aumentare con la distanza secondo una funzione iperbolica.

Il diagramma che rappresenta i tempi di propagazione delle onde sismiche in funzione della distanza del punto di emissione si definisce “curva di propagazione” o “dromocrona” (“*travel time curve*”). Definirne l'andamento è compito primario nell'interpretazione di sismica a rifrazione.

Ciò che essenzialmente conta, per il metodo a rifrazione, è identificare il tempo di arrivo della prima onda in ogni geofono (“*first break picking*”). Questa distinzione non è sempre agevole.

I due segmenti relativi all'arrivo delle onde dirette, prima, e delle rifratte frontali poi, non sono sempre facilmente distinguibili. Il punto di ginocchio, il punto cioè a partire dal quale si verifica la variazione di inclinazione, è detto distanza critica (“*cross-over distance*”).

È quindi importante osservare che la scelta dei primi arrivi deve essere considerata già come parte dell'interpretazione dei dati più che della raccolta; l'operatore dovrà perciò aver cura di verificare direttamente sul sito che il rapporto segnale/rumore sia accettabile, ed eventualmente ripetere l'acquisizione.

Metodi di interpretazione

I metodi di interpretazione per la sismica a rifrazione possono essere raggruppati in tre classi principali:

- (1) Metodi dei Tempi di intercetta (*ITM - Intercept-Time Methods*)
- (2) Metodi dei Tempi di ritardo o Reciproci (*DTM - Delay Time Method*)
- (3) Metodi di Ray tracing

Il livello di calcoli richiesto è progressivamente maggiore da metodo a metodo. I metodi ITM richiedono essenzialmente una calcolatrice. I metodi DTM variano dalla versione più semplice a quella generalizzata, e richiedono l'uso di un personal computer. I metodi basati sul Ray Tracing richiedono risorse di calcolo decisamente più elevate e non saranno presi in esame in questo contesto.

I metodi ITM - Time-Intercept Methods.

La dromocrona, o curva distanza-tempo, nel caso di un rilevamento sismico per rifrazione è espressa su un grafico dall'equazione di una retta.

In presenza di stratificazioni piane ed orizzontali l'inclinazione delle rette dei primi arrivi è uguale al reciproco della velocità di propagazione nel mezzo 1 (V_1) o nella discontinuità o secondo mezzo (V_2). Dai diagrammi di queste rette possiamo determinare lo spessore dello strato superiore.

In base alla potenza dello strato superiore, infatti, si avrà una retta con uguale inclinazione (essendo questa legata solo alle velocità) ma con un punto di ginocchio diversamente posizionato: più è potente lo strato superiore, maggiore sarà il tempo impiegato dall'onda frontale rifratta per generarsi e tornare in superficie, dunque varierà la distanza di ricezione delle onde dirette e delle rifratte frontali.

Lo spessore può essere calcolato considerando l'ascissa del punto di ginocchio (x_c) oppure considerando il tempo di intercetta t_0 cioè il valore del tempo di arrivo dell'onda rifratta a distanza 0, ottenuto proiettando sull'asse dei tempi la retta relativa alla velocità di propagazione nel secondo mezzo.

$$h = \frac{x_c}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

$$h = \frac{t_0}{2} \frac{V_2 V_1}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}$$

Caso di un singolo strato non orizzontale

Prendendo in considerazione la pendenza dello strato i calcoli si complicano:

- le velocità osservate per il secondo strato risultano essere velocità apparenti, che variano significativamente con la pendenza (maggiore alla velocità reale in direzione up-dip e minore in direzione down-dip);
- le profondità determinate mediante i tempi di intercetta sono le profondità inclinate e non le profondità reali sotto il punto di scoppio;
- sono richiesti stendimenti coniugati, in quanto i sismogrammi ottenuti in un'unica direzione forniscono unicamente una velocità apparente per il secondo strato.

Le equazioni per il calcolo delle profondità inclinate sono le seguenti:

$$\text{Profondità}_{(\text{down-dip})} = \frac{V_1 \cdot t_{i(\text{down-dip})}}{2 \cos \alpha}$$

$$\text{Profondità}_{(\text{up-dip})} = \frac{V_1 \cdot t_{i(\text{up-dip})}}{2 \cos \alpha}$$

dove

*Profondità*_(down-dip) = il rifrattore immerge dal punto di sparo verso i geofoni

*Profondità*_(up-dip) = il rifrattore risale verso il punto di sparo

V_1 = velocità del terreno

$T_{i(\text{up-dip})}$ = tempo di intercetta up-dip

$T_{i(\text{down-dip})}$ = tempo di intercetta down-dip

$$\cos \alpha = \frac{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2}$$

Un'approssimazione utile per V_2 (che non può essere misurato direttamente dalla curva dei tempi di percorso) è data dalla seguente equazione:

$$V_2 = \frac{2 \cdot V_{2(\text{up-dip})} \cdot V_{2(\text{down-dip})}}{V_{2(\text{up-dip})} + V_{2(\text{down-dip})}} \cos \delta$$

dove

V_2 = velocità approssimata dello strato sottostante

$V_{2(\text{up-dip})}$ = velocità apparente dello strato sottostante misurata up-dip

$V_{2(\text{down-dip})}$ = velocità apparente dello strato sottostante misurata down-dip

δ = valore stimato della pendenza

Il valore dell'angolo δ è calcolabile utilizzando la seguente formula:

$$\delta = \frac{\sin^{-1}\left(\frac{V_1}{V_{2(\text{down-dip})}}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{V_1}{V_{2(\text{up-dip})}}\right)}{2}$$

Poiché il coseno dell'angolo δ è approssimativamente 1.0, è necessario che le pendenze siano basse.

È necessario sottolineare che il presupposto primario nell'uso dei metodi ITM è che la geometria della superficie di contatto sia piana. Questo presupposto permette di usare le informazioni derivate dalle osservazioni (arrivi) oltre la distanza del punto di ginocchio per derivare una profondità che è determinata nell'intorno del punto di energizzazione.

Tuttavia, questi metodi sono utili per una valutazione di massima delle profondità e per eseguire un semplice controllo dei risultati ottenuti con tecniche di interpretazione più sofisticate.

Caso di terreno multistrato

Il caso di terreni multistrato non comporta particolari variazioni. I principi di calcolo rimangono gli stessi, con la sovrapposizione (arrivi da entrambe le direzioni) per tutti gli strati necessari. Per gli strati orizzontali possono essere utilizzate le seguenti equazioni:

$$h_2 = \frac{t_{i3} V_2 V_3}{2\sqrt{V_3^2 - V_2^2}} - h_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \sqrt{\frac{V_3^2 - V_1^2}{V_3^2 - V_2^2}}$$

Lo spessore h_1 del primo strato è determinato usando il caso di un terreno con due strati ed il tempo di intercetta t_{i2} del secondo segmento di linea o la distanza critica X_{c2} determinata dai primi due segmenti di linea. Questo spessore è usato nel calcolo dello spessore dello strato seguente h_2 .

In termini di distanza critica l'equazione può essere così riscritta:

$$h_2 = \frac{X_{c3}}{2} \sqrt{\frac{V_3 - V_2}{V_3 + V_2}} + \frac{h_1}{V_1} \left(\frac{V_3 \sqrt{V_2^2 - V_1^2} - V_2 \sqrt{V_3^2 - V_1^2}}{\sqrt{V_3^2 - V_2^2}} \right)$$

Il calcolo può essere esteso agli strati più profondi usando estensioni di queste equazioni generali.

Poiché le equazioni in questa forma contengono gli spessori degli strati meno profondi, il calcolo comincia con il primo strato e progredisce verso il basso. Si noti che queste equazioni non comprendono la pendenza.

Le equazioni per gli strati piani inclinati sono utilizzate nel metodo GRM (Palmer - 1980).

Metodi del Reciproco (Reciprocal methods)

I metodi reciproci includono più di 20 metodi di interpretazione, compresi i metodi basati sui tempi di ritardo, i quali possono o non possono richiedere la misura di un tempo reciproco.

Il tempo reciproco è il tempo di corsa lungo il rifrattore da una sorgente di energizzazione ad un'altra.

Esistono diverse versioni di questi metodi che si differenziano per alcuni fattori di correzione. In generale si ipotizza una superficie di contatto non eccessivamente inclinata ed una velocità del rifrattore costante.

Conoscendo il tempo di percorso dalla sorgente di energizzazione S ad un certo geofono G ed il tempo di percorso coniugato dalla sorgente S' al medesimo geofono G ed il tempo di percorso dalla sorgente di energizzazione S ad un certo geofono G1 (possibilmente distante dal primo) ed il tempo di percorso coniugato dalla sorgente S' al medesimo geofono G1 è possibile calcolare la velocità V2 del rifrattore utilizzando la seguente formulazione:

$$V_2 = \frac{2|\Delta x|}{|\Delta t| + |\Delta t'|}$$

dove:

Δx = distanza in superficie compresa tra il geofono g ed il geofono g1

Δt = differenza dei tempi di percorso diretti

$\Delta t'$ = differenza dei tempi di percorso coniugato

Il tempo t di percorso diretto per il geofono G può essere espresso dalla seguente formulazione:

$$t = \frac{h_g + h_s}{V_1} \cos i_c + \frac{x_g}{V_2}$$

dove

h_g = minima profondità in corrispondenza del geofono

h_s = minima profondità in corrispondenza della sorgente

x_g = distanza fra il geofono e lo sparo

Analogamente potrà essere scritta una equazione equivalente per il tempo impiegato dall'onda sismica a raggiungere il geofono G partendo dalla sorgente coniugata.

I tempi calcolati saranno ovviamente differenti; ciò che invece deve essere uguale è il tempo del percorso totale, fra le sorgenti dirette e coniugate. Questo tempo è chiamato tempo di estremità:

$$t = \frac{h_s + h_{s'}}{V_1} \cos i_c + \frac{x_0}{V_2}$$

dove x_0 è uguale alla somma della distanza del geofono dal punto di sparo del percorso diretto e della distanza del geofono dal punto di sparo nel percorso coniugato.

Sottraendo al tempo di estremità la somma dei tempi precedentemente calcolati, è possibile risolvere l'equazione rispetto ad h ed ottenere la profondità minima. Tale procedimento dovrà essere eseguito per ogni geofono.

La profondità h rappresenta il raggio di un arco di circonferenza con centro nella posizione del relativo geofono: il contorno del rifrattore toccherà almeno in un punto ciascuno di questi archi e quindi potrà essere determinato graficamente come involuppo degli archi.

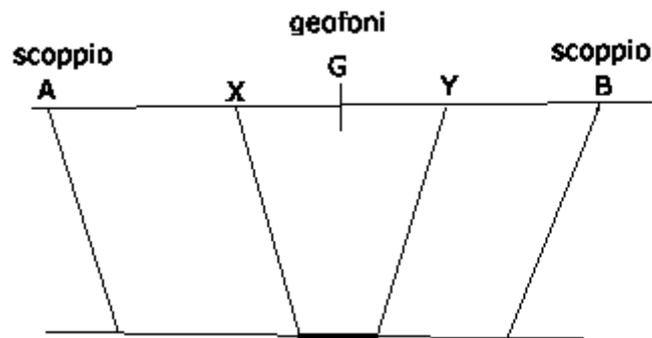
Metodo del Reciproco Generalizzato (Generalized Reciprocal Method - GRM)

Il metodo reciproco generalizzato è stato sviluppato per sormontare alcune imperfezioni dei metodi più semplici, i quali sono messi in difficoltà dalla presenza di superfici, topografiche o del sottosuolo, particolarmente accidentate.

Il metodo di Palmer utilizza due funzioni: la funzione di analisi-velocità e la funzione tempo-profondità.

La funzione Analisi Velocità

La particolarità del metodo è l'uso degli arrivi diretti ed inversi a due geofoni, posti ad una distanza XY. Se la posizione di XY è scelta in modo che il punto di emersione dal rifrattore sia comune, il tempo di percorso, e quindi il calcolo della velocità, dipenderà soltanto dalle caratteristiche del materiale.



La funzione analisi-velocità, riferendosi alla figura sottostante, è definita dall'equazione:

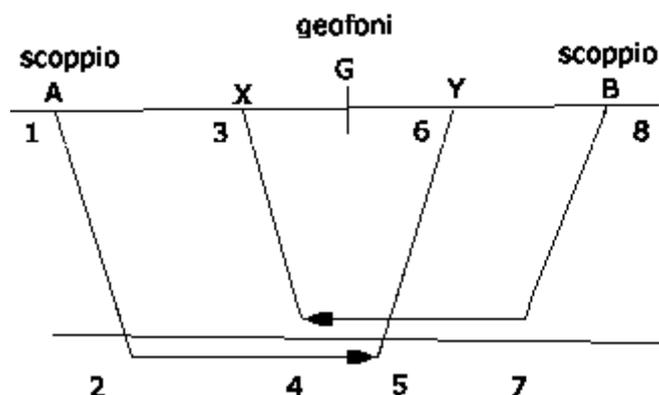
$$t = \frac{t_{AY} - t_{BX} + t_{AB}}{2}$$

$$t_{AY} = (12) + (34) + (45) + (56)$$

$$t_{BX} = (78) + (57) + (45) + (34)$$

$$t_{AB} = (12) + (24) + (45) + (57) + (78)$$

$$t = \frac{2(12) + 2(24) + (45)}{2}$$



Il valore di questa funzione è riferito al punto mediano G fra X e Y.

Producendo i grafici dei tempi di percorso in relazione alla posizione dei geofoni è possibile derivare la velocità V_2 del rifrattore, indipendentemente dall'inclinazione e dalla topografia. Ciò che influenza il calcolo è dunque la scelta dei geofoni XY. Se la posizione di XY è scelta

in modo che il punto d'uscita sul rifrattore sia comune, il tempo di percorso, e quindi il calcolo della velocità, dipenderà soltanto dalle caratteristiche del materiale.

La funzione Tempo-Profondità

Il metodo GRM prevede ora la creazione di funzioni tempo-profondità per ciascun geofono. Facendo riferimento alla figura precedente la funzione generalizzata tempo-profondità è definita dall'equazione:

$$t = \frac{t_{AY} + t_{BX} - (t_{AB} + XY / V_2)}{2}$$

Calcolo del valore di XY ottimale

La valutazione della distanza XY ottimale può essere ottenuta utilizzando le velocità e gli spessori di strato precedentemente determinati: se sono noti gli spessori e le velocità di ciascuno strato, il valore XY per ogni strato può essere calcolato direttamente, quindi applicando un procedimento iterativo è possibile determinare tali valori automaticamente e con notevole precisione.

12 Ringraziamenti

Un ringraziamento speciale va a Giorgio Scioldo, Roberto Sperandio e Ilaria Marietti titolari e collaboratori dello studio Ingeoproject in cui il presente lavoro di tesi è stato svolto.

Un ringraziamento va al gruppo di lavoro del progetto tra cui: Giuseppe Galliano, Fausto Mulattieri, Giorgio Colombo, Mariangela Borio.

Un grazie particolare va ai relatori Professor Guido Musso e la Professoressa Monica Barbero che mi hanno guidato nella stesura dell'elaborato.

Vorrei ringraziare i miei compagni di corso soprattutto Lorenzo Petrolo, Paolo Tamagnone ed Elena Ravera per tutti i lavori di gruppo svolti durante il percorso di studi e le preparazioni per gli esami.

Un ringraziamento ai miei amici in particolare a Matteo Bertot.

Un ringraziamento va alla mia famiglia, a mia sorella, ai miei genitori e a Francesca Malan.