Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica

Politecnico di Bari

Convenzione tra il Commissario di Governo per l'Emergenza Idrogeologica della Regione Puglia ed il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Del Territorio, Edile e di Chimica del Politecnico di Bari

CARATTERIZZAZIONE DELLE FENOMENOLOGIE EVOLUTIVE DEL VERSANTE OCCIDENTALE DELL'ABITATO DI CHIEUTI (FG) SIA IN CONDIZIONI STATICHE CHE DINAMICHE

II FASE DELLA CONVENZIONE

RELAZIONE FINALE

Responsabili Scientifici

Prof. Ing. Federica Cotecchia — Federica Cotecchia

Prof. Ing. Gaetano Elia — Gaetano Elia

Bari 31/03/2023

Gruppo di lavoro

Dott. Ing. Annamaria di Lernia

Dott. Ing. Simona Guglielmi

Dott. Geol. Francesca Santaloia

Dott. Ing. Alberico Sonnessa

Ing. Marianna Stragapede

Dott. Ing. Vito Tagarelli

INTRODUZIONE

Il presente rapporto, prosieguo ed integrazione della I Relazione di II Fase conclusa nel gennaio del 2022, descrive i risultati finali delle attività svolte durante la Convenzione, stipulata tra il Commissario di Governo per l'Emergenza Idrogeologica della Regione Puglia ed il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica (DICATECh) del Politecnico di Bari, finalizzata alla caratterizzazione delle fenomenologie evolutive del versante occidentale dell'abitato di Chieuti (FG) sia in condizioni statiche che dinamiche.

In particolare, le attività di cui alla presente relazione hanno riguardato l'avanzamento, rispetto agli studi già riportati nella I Relazione di II Fase, dell'analisi ed interpretazione:

- del campo degli spostamenti del versante, dell'evoluzione del danno e della configurazione geomorfologica del versante (Capitolo 1);
- delle resistenze dei terreni nel pendio (Capitolo 2);
- dell'assetto piezometrico del versante (Capitolo 3);
- delle resistenze operative nelle bande di taglio presenti nel pendio (Capitolo 4);
- della modellazione numerica della storia geologica del versante, volta a simulare le condizioni di primo innesco del processo franoso (Capitolo 5);
- degli effetti di interazione pendio-vegetazione-atmosfera (Capitolo 6).

I risultati conseguiti dalle suddette attività hanno permesso di inquadrare quantitativamente tutti i fattori di pendio che incidono sull'evoluzione dei processi di snervamento ed evoluzione della deformazione, a causa delle azioni esterne, portando alla ricostruzione dell'assetto dei corpi franosi presenti ed alla diagnosi delle possibili cause del meccanismo di frana che coinvolge il versante oggetto di studio. Le interpretazioni degli aspetti che incidono sull'attività ed evoluzione del processo franoso, riportate, di volta in volta, nei primi sei capitoli rappresentano, di per sé, le conclusioni dell'analisi diagnostica svolta nell'ambito della Convenzione. Nel Capitolo 7 sono, invece, illustrate, a titolo esemplificativo, alcune delle possibili strategie di mitigazione della pericolosità da frana o di stabilizzazione del pendio, atte ad aumentare il fattore di sicurezza dei corpi oggi riscontrati tra i più instabili nel versante.

1 AVANZAMENTO DELLE ANALISI DEL CAMPO DEGLI SPOSTAMENTI NEL VERSANTE OCCIDENTALE DI CHIEUTI, DELL'EVOLUZIONE DEL DANNO (DICEMBRE 2021-DICEMBRE 2022) E DELLA CONFIGURAZIONE GEOMORFOLOGICA DEL VERSANTE

1.1 Analisi del campo degli spostamenti di superficie

Di seguito vengono riportate le analisi dei dati di monitoraggio acquisiti attraverso differenti metodologie geomatiche, il cui utilizzo congiunto ha consentito di caratterizzare il campo degli spostamenti di superficie generato dalle fenomenologie franose oggetto di indagine nel settore nord-occidentale del centro storico e nel versante a valle, valutandone le velocità e l'evoluzione sul medio-lungo periodo.

Attraverso l'applicazione della tecnica di interferometria satellitare multitemporale basata su sensori radar ad apertura sintetica (Multi-temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar – MTInSAR), sono stati stimati i principali parametri cinematici ed è stata caratterizzata l'entità dei movimenti differenziali.

I risultati ottenuti hanno guidato la progettazione del sistema di monitoraggio geomatico attualmente in funzione nella parte alta del versante occidentale, che prevede, insieme al controllo in tempo reale dell'inclinazione della struttura di contenimento, anche un'attività di livellazione geometrica di precisione, le cui misure sono state acquisite a partire da Maggio 2021. Al fine di valutare gli spostamenti tridimensionali (plano-altimetrici) lungo l'intero versante occidentale, è stata inoltre posizionata una serie di prismi retroriflettori lungo il versante, rilevati attraverso Stazione Totale Automatica, con misure trigonometriche.

1.1.1 Cenni sulle metodologie geomatiche impiegate

1.1.1.1 MTInSAR

La tecnica MTInSAR sfrutta le osservazioni relative ad aree molto vaste (fino ad alcune decine di migliaia di km^2) da parte di costellazioni satellitari dotate di sensori radar ad apertura sintetica (Synthetic Aperture Radar – SAR). Le costellazioni satellitari vengono classificate in base allo scopo, o missione, per cui sono messe in orbita. Nel caso del monitoraggio a medio-lungo termine dei cambiamenti nella superficie terrestre, la disponibilità sistematica di acquisizioni di una stessa porzione di territorio, la cui frequenza è detta tempo di rivisitazione (pari a pochi giorni nelle missioni più recenti), consente di implementare tecniche di analisi degli spostamenti che costituiscono uno strumento efficace e consolidato per lo studio di fenomeni di dissesto franoso. La metodologia si basa sul riconoscimento di target appartenenti all'area indagata, identificabili in ciascuna immagine acquisita dal sensore, la cui riflettività è sufficientemente indipendente dalle baseline sia temporaliche geometriche. Questi particolari pixel, detti Persistent Scatterers (PS), costituiti tipicamente da parti di strutture metalliche/murarie o elementi naturali quali rocce esposte, hanno caratteristiche elettromagnetiche che nonvariano sensibilmente tra due acquisizioni. I PS rappresentano quindi punti con elevata stabilità di fase (e cioè caratterizzati da un elevato valore del rapporto segnale/rumore, definito come coerenza, espresso su una scala normalizzata che va da 0 ad 1), grazie ai quali è possibile monitorare le porzioni di territorio in cui sono presenti su lunghi periodi di tempo. La metodologia permette, in linea di principio, di

individuare i trend di spostamento di PS nel tempo con accuratezza millimetrica, qualora si abbia la possibilità di disporre di un numero consistente di osservazioni relative alla stessa area.

In quest'ambito, l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) gioca un ruolo fondamentale attraverso il programma Copernicus, che include i dati acquisiti dai satelliti Sentinel-1 (S1) e dalle missioni partecipanti, quali COSMO-SkyMed (CSK). S1 è costituito da due satelliti operanti in banda C, mentre CSK utilizza quattro satelliti che sfruttano la banda X. Entrambe le costellazioni si muovono su orbite quasi polari.

1.1.1.2 Livellazione geometrica di precisione

La livellazione geometrica di precisione è una tecnica geomatica consolidata, ampiamente utilizzata in applicazioni che vanno dal monitoraggio del movimento del terreno al controllo di strutture/infrastrutture. La metodologia consente la determinazione di dislivelli, attraverso l'utilizzo di livelli digitali e stadie invar, tra capisaldi, monumentati nelle zone o sulle strutture che si intende controllare in maniera da garantire la ripetibilità e la precisione delle misure. Se correttamente applicata, la metodologia permette di arrivare a precisioni inferiori a 1mm per dislivelli tra capisaldi posti ad una distanza nell'ordine di 1 km.

1.1.1.3 Misure trigonometriche con Stazione Totale Automatica

La Stazione Totale è un sensore topografico che consente di monitorare la posizione plano-altimetrica di prismi retro-riflettori, installati su strutture e/o aree che si intende controllare, mediante la misura diretta di distanze, angoli zenitali e direzioni azimutali. Per il monitoraggio del versante nord-occidentale di Chieuti è stata utilizzata una Stazione Totale Automatica (di seguito ST), caratterizzata dalla possibilità di effettuare misure anche senza la presenza di un operatore, una volta configurata, attraverso la funzionalità di riconoscimento automatico del target (ATR- Automatic Target Recognition).

1.1.1.4 Analisi dei dati da interferometria differenziale

Di seguito viene illustrata l'analisi a ritroso (back-analysis) sviluppata utilizzando la metodologia MTInSAR e finalizzata a stimare la distribuzione e l'entità del campo degli spostamenti di superficie nell'area indagata, a partire dal dataset interferometrico elaborato da Planetek Italia s.r.l. e acquisito nell'ambito del Programma europeo Copernicus dalle costellazioni satellitari S1 e CSK. L'analisi dei PS è finalizzata a valutare gli effetti del dissesto sull'area costruita, e conseguentemente, con l'ipotesi di assenza di deformazione delle strutture, l'evoluzione degli spostamenti nel contesto del sistema di scarpate alla testa del versante. Per la caratterizzazione dell'area di Chieuti sono state elaborate immagini SAR acquisite in banda X e C, le cui caratteristiche sono elencate in Tabella 1.1Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..

1.1.2 Analisi degli spostamenti lungo la linea di vista del satellite (LoS)

Le mappe delle velocità medie di spostamento, stimate lungo la linea di vista (Line Of Sight – LoS) del satellite, relative al dataset S1 vengono mostrate in

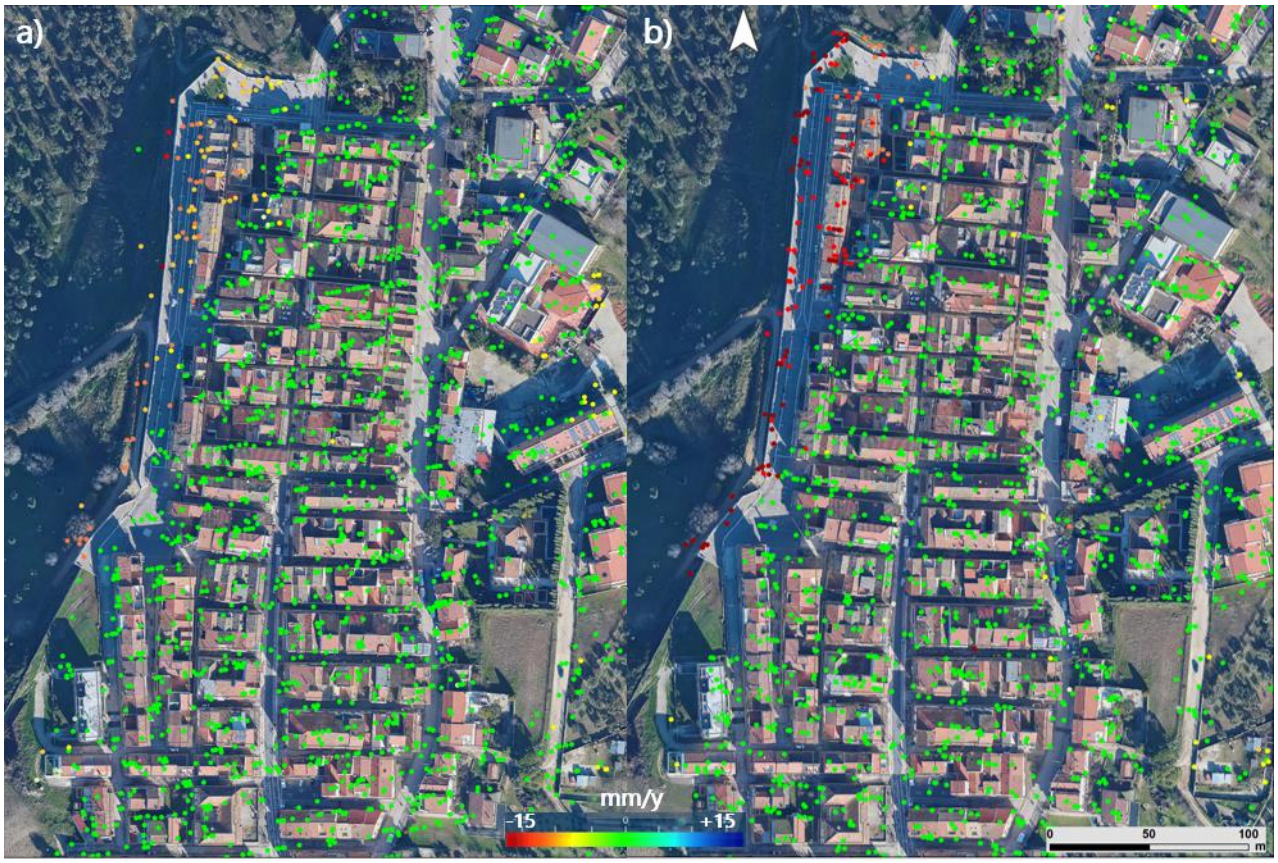


Figura 1.1, ove in a sono quelle corrispondenti alle osservazioni acquisite lungo l'orbita ascendente ed in b quelle lungo l'orbita discendente. Entrambe le mappe consentono di identificare chiaramente la zona edificata interessata dal dissesto e la sua estensione che, confermando quanto rilevato in campo, coinvolge principalmente la parte occidentale del centro storico. L'instabilità quindi include, alla testa del versante, un'area abitata di circa 9000 m^2, delimitata da Via Martiri di via Fani, Largo Quattro Novembre e Via Vitalia, e si estende sino alle case INA a sud. Come evidenziato in Figura 1.2, dove sono presentati congiuntamente i PS ottenuti dalle acquisizioni lungo entrambe le orbite. Le velocità di allontanamento dal sensore variano da millimetri a centimetri all'anno, con un massimo di -13 mm/anno lungo l'orbita ascendente e -15 mm/anno lungo quella discendente.

Tabella 1.1 Caratteristiche principali dei dataset SAR analizzati.

Satellite	**Modalità di acquisizione**	**Risoluzione spaziale (AzimuthxRange)**	**Orbita**	**Risoluzione temporale massima sull'area di studio**	**Copertura temporale**
CSK	Stripmap/Himage	3mx3m	Ascendente	16 giorni	Gennaio 2015-Dicembre 2020
			Discendente		Febbraio 2016-Dicembre 2020
S1	Interferometric wide-swath	20mx5m	Ascendente	6 giorni (12 giorni dopo Dicembre 2021)	Aprile 2015 – Febbraio 2021
			Discendente		Aprile 2015 –

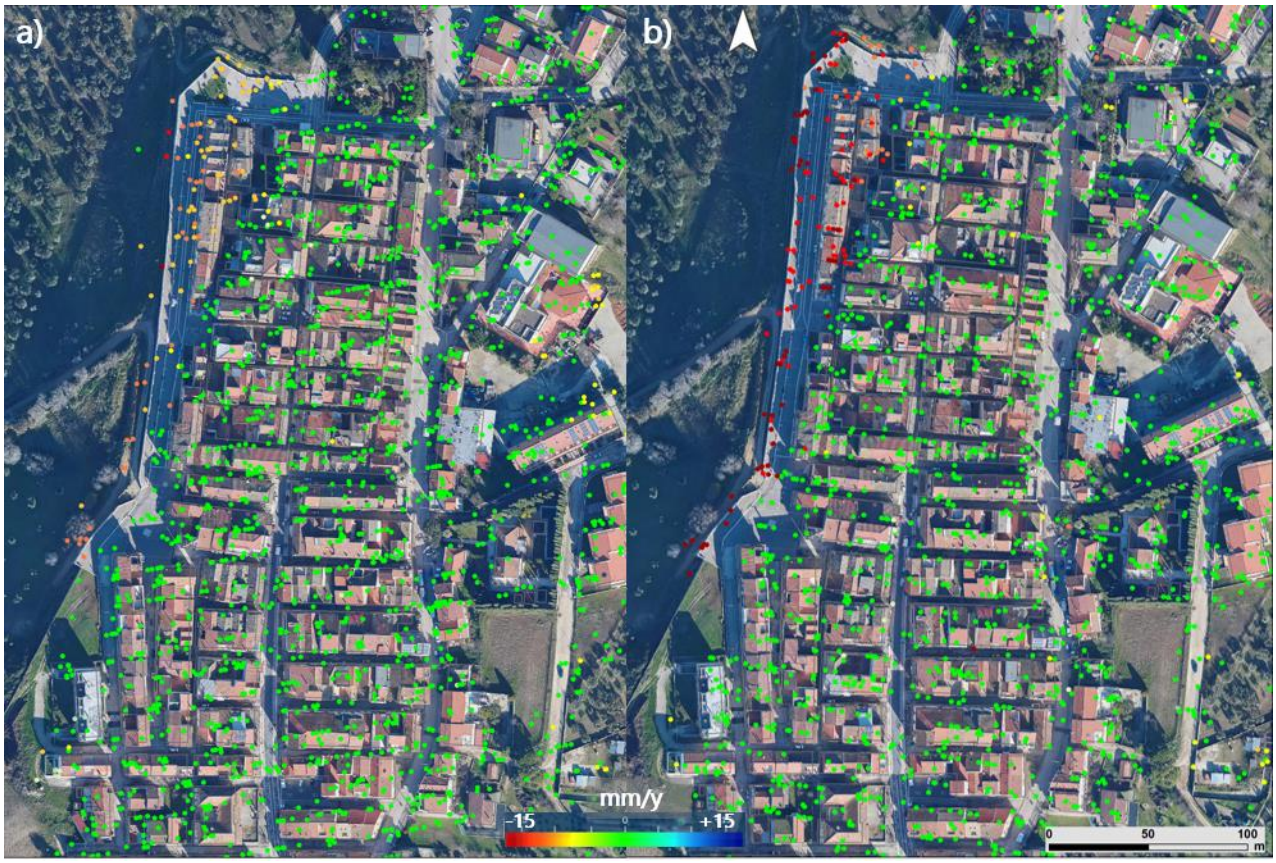


Figura 1.1 Mappe di spostamento (dataset S1) relative al periodo Aprile 2015 – Febbraio 2021 (S1); (a) orbita ascendente (b) orbita discendente

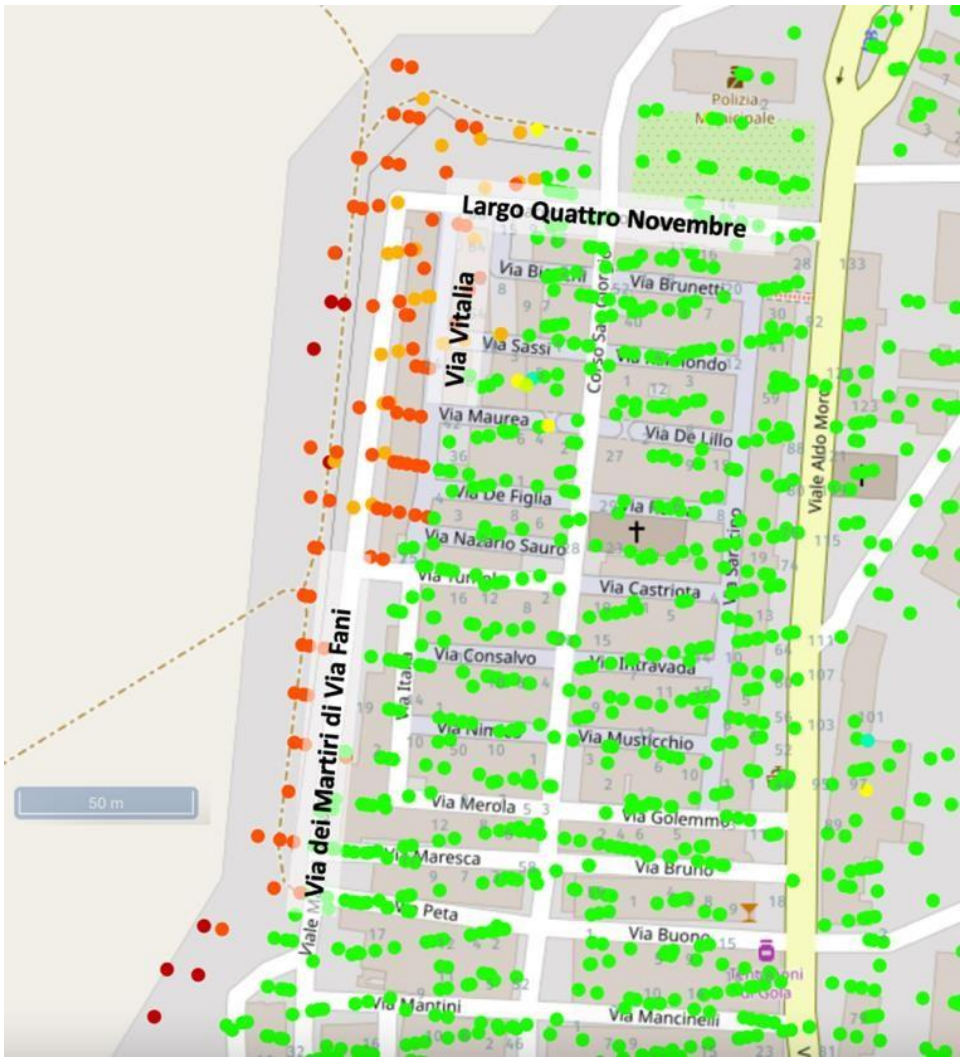


Figura 1.2 Area urbanizzata interessata dal fenomeno franoso. In figura sono visualizzati i PS relativi ad entrambe le orbite (S1).

1.1.2.1 Spostamenti differenziali lungo la LoS (orbita discendente)

Con lo scopo di caratterizzare i movimenti differenziali, potenzialmente dannosi per le strutture, è stata effettuata un'analisi parametrica sui valori di coerenza e velocità media, relativi al dataset discendente acquisito da S1.

Una prima classificazione ha consentito di evidenziare le aree caratterizzate dalle maggiori velocità di spostamento selezionando i PS in base alle soglie di seguito elencati:

- coerenza ≥ 0.75 (su una scala normalizzata nel range 0 - 1)
- velocità media ≥ 12 mm/anno

I risultati sono sintetizzati in Tabella 1.2 Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.e Figura 1.3 a.

Per massimizzare l'affidabilità dei risultati, è stata effettuata un'ulteriore classificazione prendendo in considerazione solo i target caratterizzati da un rapporto segnale/rumore molto elevato, secondo i seguenti criteri:

- coerenza ≥ 0.9
- velocità media ≤ -8 mm/anno

I risultati vengono mostrati in Tabella 1.3 e Figura 1.3 b.

Tabella 1.2 PS caratterizzati dalle maggiori velocità di allontanamento dal sensore, selezionati dal dataset S1 acquisito lungo l'orbita discendente.

A	**V LoS (mm/anno)**	**B**	**V LoS (mm/anno)**
1	-15	5	-12
2	-14	6	-13
3	-15.	7	-14
4	-14	8	-14
V Los (media)	**-15**		**-13**
Dev.st.	**1**		**1**

Tabella 1.3 PS caratterizzati (S1) da valori di coerenza (≥ 0,9) e velocità di spostamento elevati.

C	**V LoS (mm/anno)**	**D**	**V LoS (mm/anno)**	**E**	**V LoS (mm/anno)**
9	-9	15	-9	20	-9
10	-9	16	-10	21	-10
11	-9	17	-10	22	-9
12	-10	18	-10		
13	-10	19	-10		
14	-11				
V Los (media)	**-10**		**-10**		**-10**
Dev. st.	**1**		**0**		**0**

L'analisi ha messo in luce la presenza di cluster caratterizzati dallo stesso comportamento in termini di velocità, localizzati principalmente su Via Martiri di Via Fani, a ridosso della struttura di contenimento. In Figura 1.3Errore. L'origine riferimento non è stata trovata., i settori lungo Via Martiri di Via Fani: A e B, sede di velocità maggiori, e C, D ed E, sede di velocità relativamente inferiori, sono sede di velocità di spostamento piuttosto uniformi, diverse tra i diversi cluster (scatteratori in rosso per cluster A e B, in arancione per i cluster C, D ed E). Le aree A e B (scatteratori in rosso), situate rispettivamente nella parte sud e nord della via, sono sede delle velocità di spostamento più elevata (da -13 a -15 mm/a). È stata rilevata una velocità leggermente inferiore per i settori C, D ed E, il che mette in luce movimenti differenziali che possono aver inciso sulle attuali condizioni tenso-deformative dell'opera di contenimento. I dati relativi alle aree A e B sono coerenti con quanto sarà esposto nel par. 1.4, dove si evidenzierà come tali cluster risiedano lungo delle scarpate interne, connesse a due processi franosi secondari, S1 e S2B, particolarmente attivi. Si precisa che la posizione dei PS mostrati è affetta dall'incertezza legata alla georeferenziazione degli scatteratori, propria della metodologia utilizzata, per cui l'analisi è stata condotta aggregando pixel contigui che vanno a definire un comportamento areale.

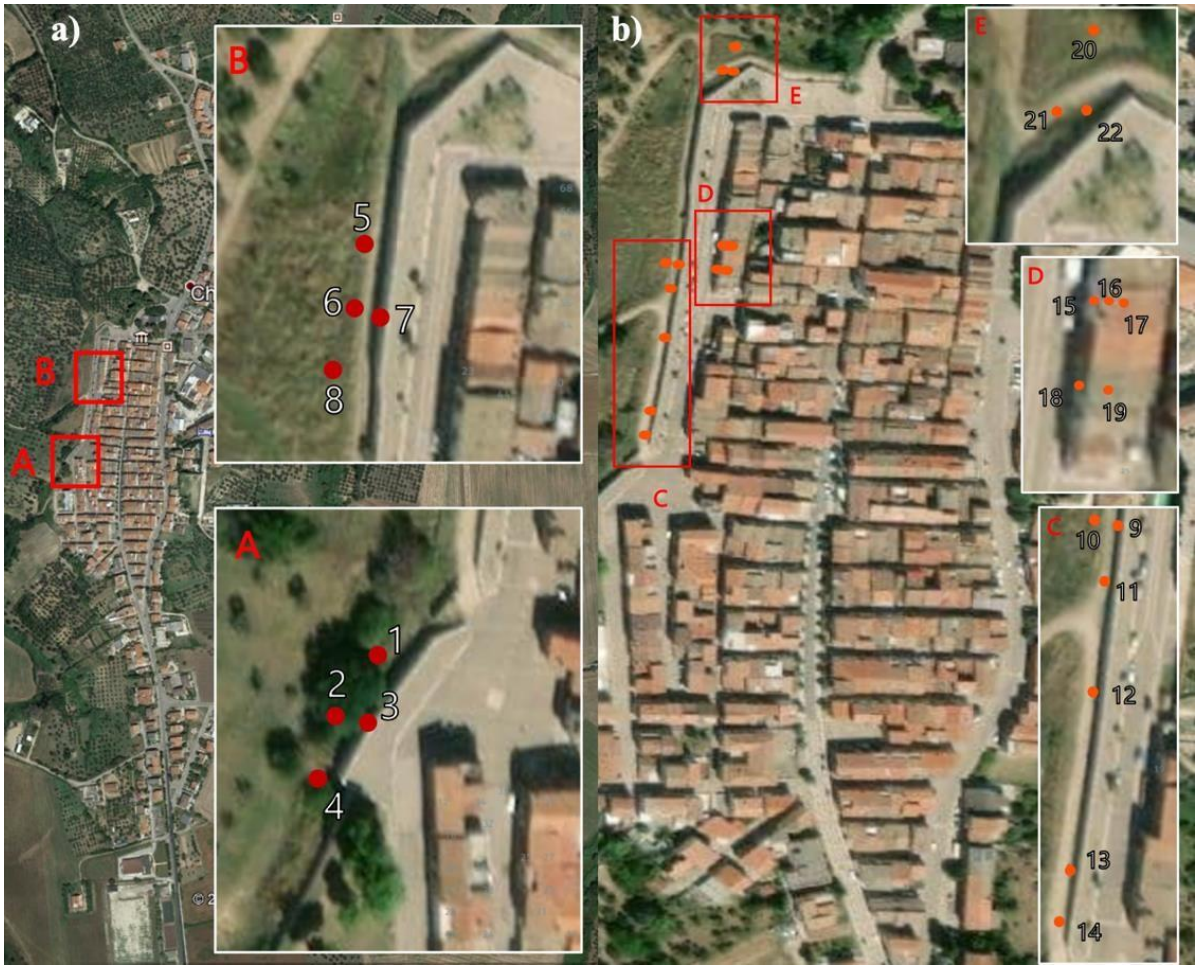


Figura 1.3 Aree caratterizzate dalle velocità medie (S1) più elevate (a) e settori contraddistinti da valori di velocità di spostamento e coerenza elevati (≥ 0,9) (b) nel periodo 2015-2021.

Le mappe di velocità media estratte a partire dai dati CSK, caratterizzati da una migliore risoluzione spaziale rispetto ai sensori S1, evidenziano come anche l'area del depuratore, sia interessata dai fenomeni di dissesto (Figura 1.4)

1.1.2.2 Valutazione dei trend non lineari attraverso l'analisi combinata dei dataset CSK e S1

L'analisi del comportamento della parte alta del versante è stata approfondita attraverso la valutazione dei pattern di spostamento nel tempo di nove target allineati lungo l'opera di sostegno (Figura 1.5, target da A ad I) ed un target localizzato nell'area del depuratore (L), estratti dalle mappe di spostamento relative all'orbita discendente.

Rispetto a quanto già discusso nel precedente stato di avanzamento, si è estesa l'area di analisi alla zona del depuratore e, allo scopo di validare i trend di spostamento evidenziati dalle serie storiche S1, si è tenuto conto anche delle corrispondenti serie temporali CSK, selezionate in base ai valori di coerenza, (≥ 0.7), alla distanza plano-altimetrica dallo scatteratore S1 di riferimento e alla differenza di velocità (contenuta al massimo in 1.5 mm/anno).

Le corrispondenti serie temporali sono mostrate in Figura 1.6.

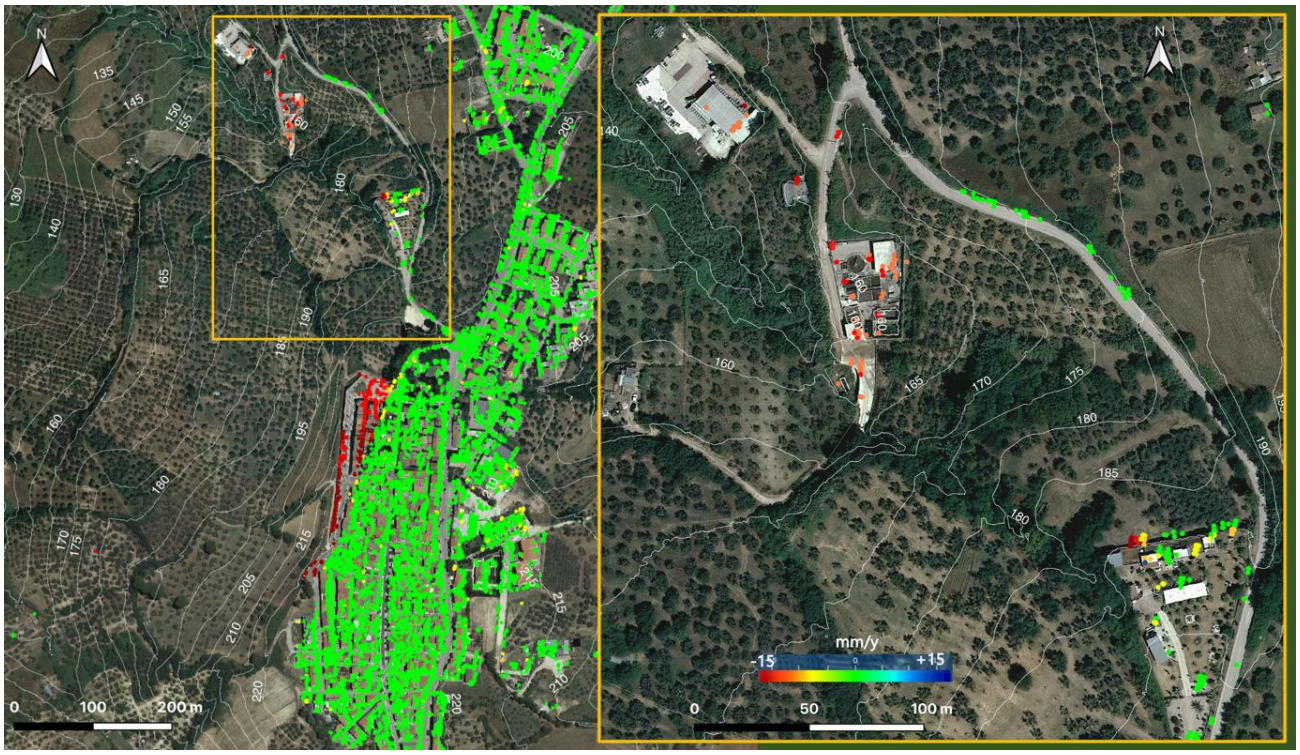


Figura 1.4 Mappa di velocità media (CSK, orbita discendente) relative all'area di studio. In dettaglio, nel riquadro arancione, è evidenziata l'area del depuratore.

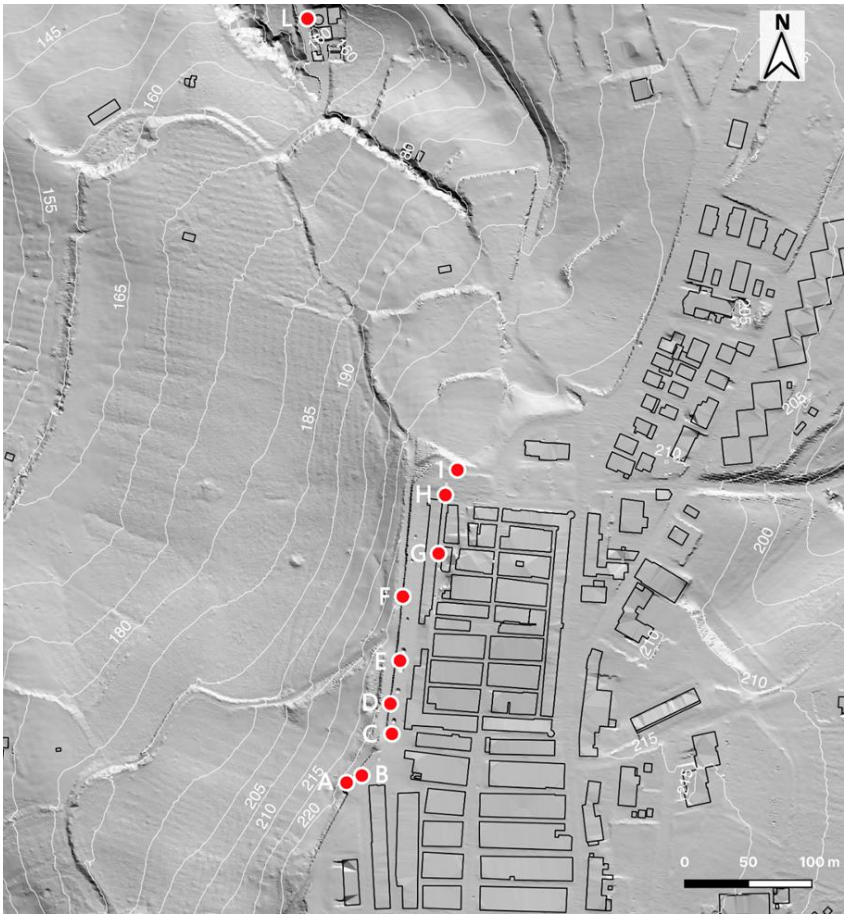


Figura 1.5 Posizione dei PS ad alta coerenza (0.7), estratti dalle mappe di spostamento relative all'orbita discendente.

Le serie temporali, caratterizzate da valori di spostamento cumulato lungo la LoS compresi tra circa -50 e -90 mm nel periodo analizzato (7 anni), evidenziano un trend comune a tutti gli scatteratori presi in considerazione, caratterizzato da fasi di velocità costante interrotte da fasi di accelerazione, in cui si sviluppa mediamente un incremento di spostamento pari a 10 mm. Le fasi di accelerazione, della durata (media) di circa 1 mese, ricorrono, in prima approssimazione, una volta all'anno. Nel periodo di tempo che intercorre tra due accelerazioni (10-16 mesi), le velocità di spostamento sono costanti e relativamente basse (~ 7-13 mm/anno). Lo spostamento cumulato massimo è stato riscontrato nella parte meridionale, per gli scatteratori A e B in Figura 1.5, e per lo scatteratore G approssimativamente in Via Vitalia.

Andamenti simili sono riscontrabili con l'analisi delle serie temporali di gruppi di PS (da A0 ad A5 in Figura 1.7) allineati approssimativamente lungo la direzione della massima pendenza, selezionati per indagare le variazioni di velocità di spostamento lungo la LoS andando dalla struttura di contenimento al ciglio del versante, verso l'interno dell'abitato.

Gli identificativi numerici 1, 2 e 3 preceduti dall'identificativo dell'allineamento considerato, Ai, individuano rispettivamente il punto più esterno (collocato sulla struttura di contenimento), un punto intermedio e uno scatteratore prossimo alla scarpata principale, ossia la più interna al centro abitato (SR2, Prima Relazione di II fase).

L'analisi così configurata fornisce informazioni sulle caratteristiche spaziali e temporali del campo di spostamento in superficie, consentendo di identificare le porzioni stabili (spostamenti nulli), i differenziali di spostamento e le tempistiche di accelerazione (Figura 1.8). Lungo l'allineamento A0 nell'area meridionale, la netta differenza di velocità tra i punti A0_2 e A0_1 mette in evidenza il forte differenziale di spostamento in atto nella seppur limitata sezione di Via Martiri di Via Fani, dove si sviluppa un forte piegamento verso valle della sede stradale, ossia un gradino indicativo dell'affiorare della scarpata del complesso franoso, come già messo in evidenza nel Capitolo 2 della I Relazione di II fase (Figura 2.6.3). Spostandosi verso nord, gli allineamenti da A1 ad A5 risultano caratterizzati da distribuzione spazio-temporale dello spostamento simile. In particolare, sono limitate le differenze di velocità tra il punto più esterno della serie trasversale (a ridosso dell'opera di contenimento) e quello intermedio, collocato a ridosso della prima stecca di abitazioni lungo Via Martiri di Via Fani, il che suggerisce un movimento comune dei punti interni a questa porzione al ciglio del versante (come se appartenenti ad uno stesso blocco in movimento). Lungo gli allineamenti A3 e A4, invece, i punti A3_3 e A4_3, a ridosso della scarpata principale più interna al paese, SR2 in Figura 10.1.1 della I Relazione di II Fase, evidenziano velocità più basse, suggerendo l'attuale perdurare di un processo retrogressivo di rottura (progressione in profondità delle bande di taglio sede di snervamento).

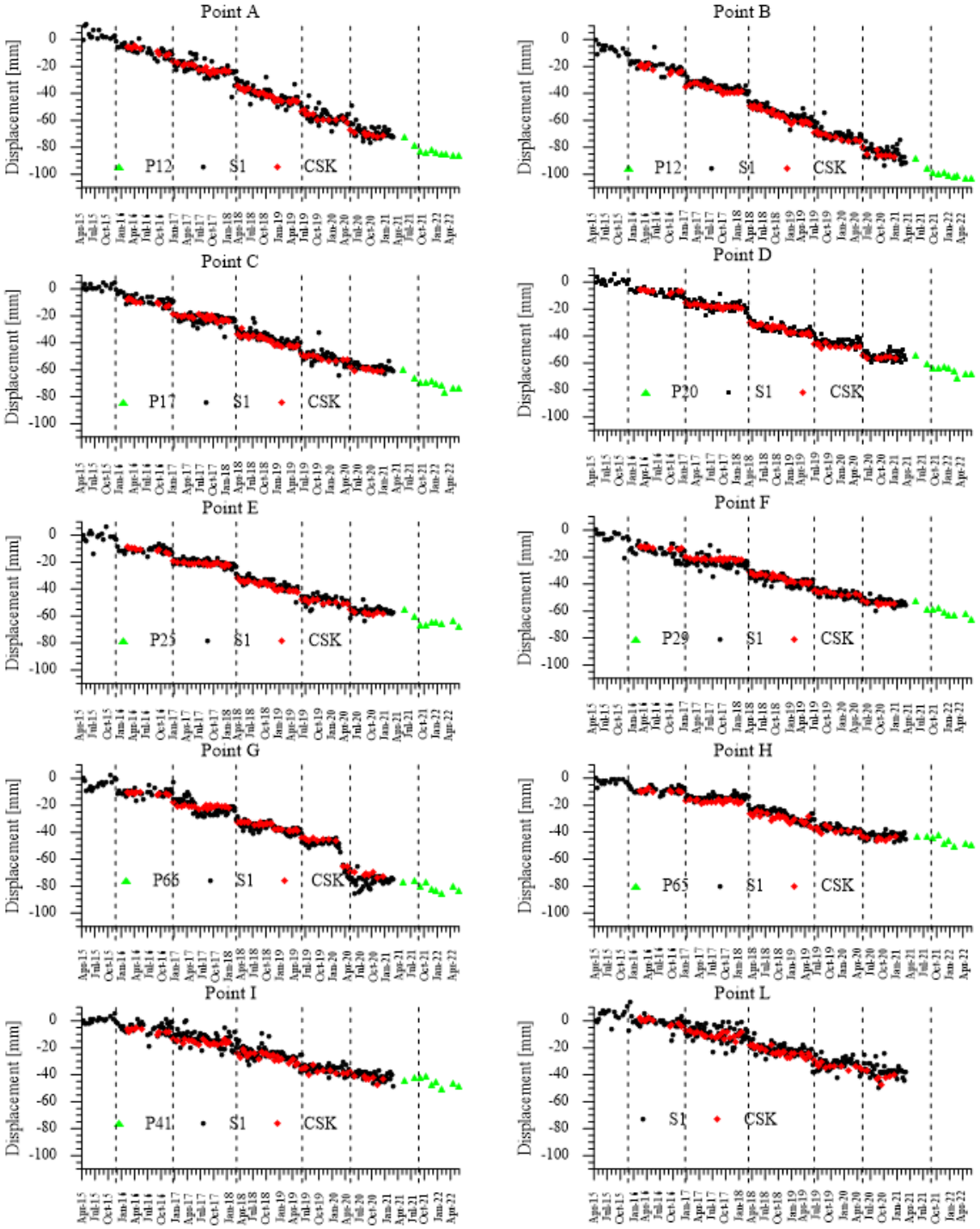


Figura 1.6 Serie temporali di spostamento lungo la LoS dei target A-L appartenenti al dataset CSK (in rosso), e corrispondenti serie temporali estratte dal dataset S1 (in nero). Le linee tratteggiate verticali indicano i periodi di accelerazione. I triangoli verdi sono relativi alle misure di livellazione dei capisaldi vicini ai PS selezionati.

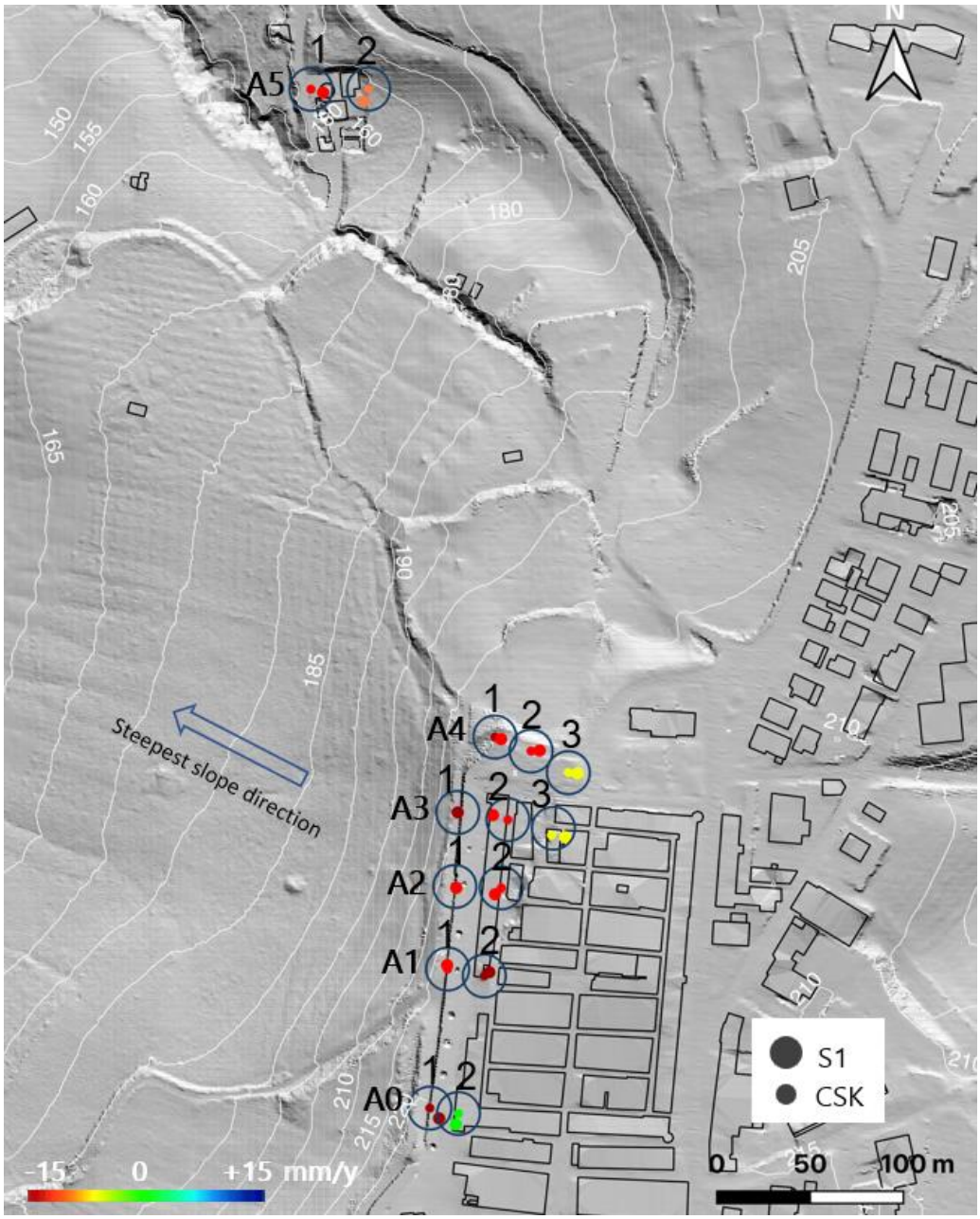


Figura 1.7 PS selezionati lungo sei allineamenti orientati lungo la direzione di massima pendenza.

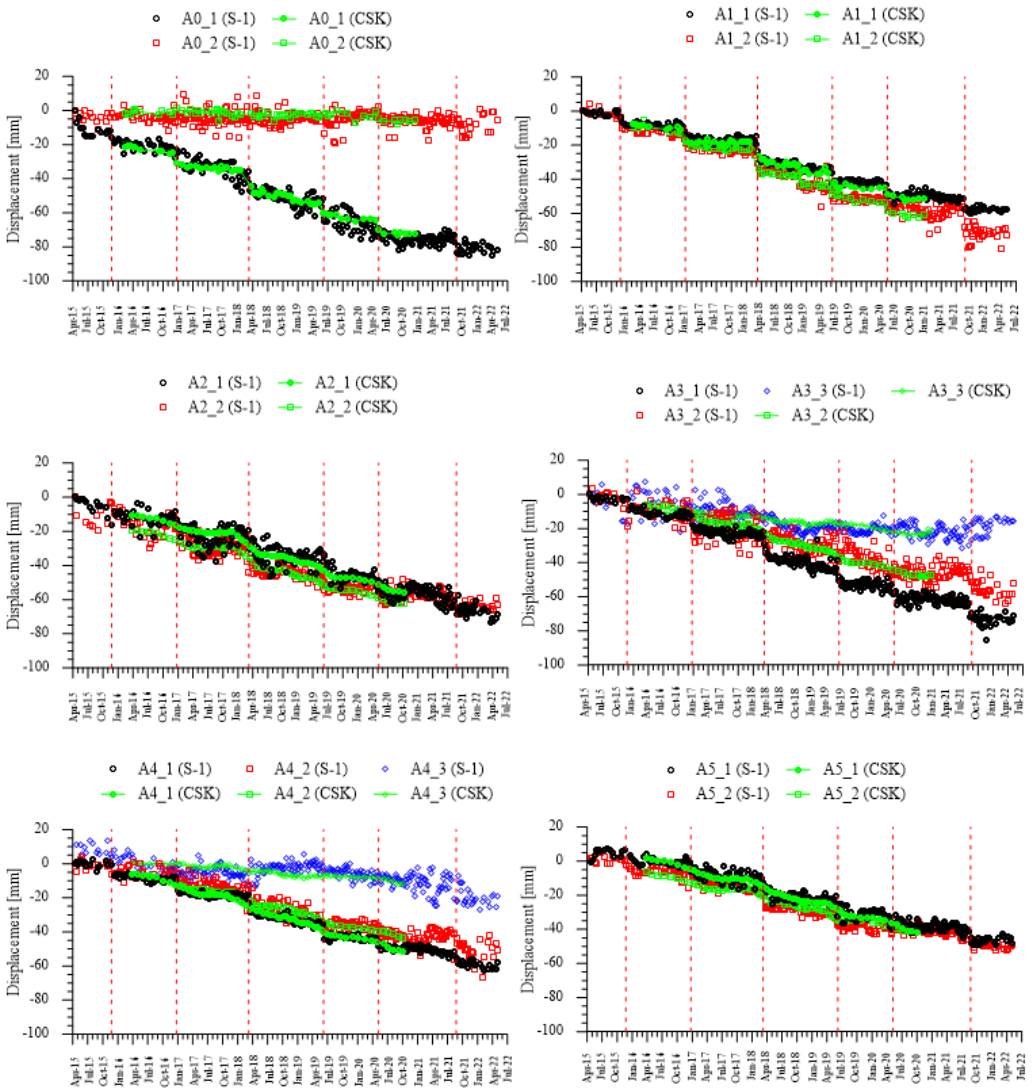


Figura 1.8 Serie temporali di spostamento lungo la LoS relative a quattordici PS (CSK+S1) situati lungo la direzione della massima pendenza. Le linee rosse indicano le fasi di accelerazione.

L'analisi effettuata mette quindi in luce come, nella parte alta del pendio, vi siano aree sede di una certa uniformità di spostamento e settori sede di spostamenti differenziali.

Il succedersi di differenti step nei trend di spostamento è reso evidente dalla suddivisione dell'intervallo di osservazione in fasi a diversa velocità, come riportato nelle mappe S1 trimestrali discusse nel seguito. A titolo esemplificativo in Figura 1.9 e Figura 1.10 vengono riportate due mappe di velocità, rispettivamente corrispondenti ad una fase caratterizzata da valori di velocità piuttosto costante nel tempo e relativamente bassa, e ad una fase di accelerazione.

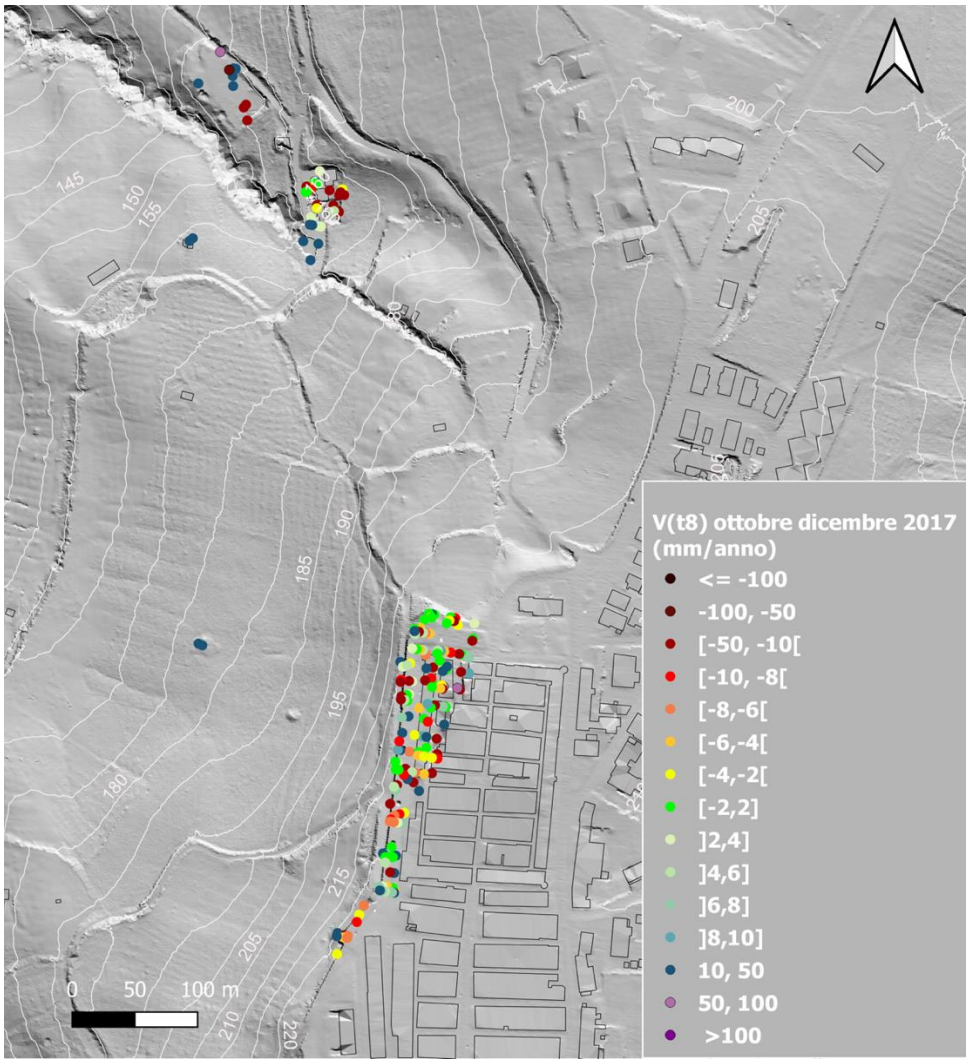


Figura 1.9 Mappa di velocità corrispondente ad una fase caratterizzata da velocità di allontanamento dal sensore lungo la LoS mediamente basse.

Le mappe relative agli altri trimestri sono riportate nell'Appendice della presente relazione, ed evidenziano come l'alternarsi di periodi a bassa velocità e periodi di accelerazione sia una caratteristica dell'intera area urbanizzata che rientra nella scarpata del bacino franoso e come, nelle fasi di accelerazione (Figura 1.10), l'aumento di velocità investa piuttosto uniformemente l'area che si colloca tra il ciglio del versante e la scarpata SR2 (Figura 6.4.6 della I Relazione di II fase). La Figura 1.10 inoltre mostra come le accelerazioni interessino anche la zona del depuratore, a ridosso della sorgente Crojo. Quest'ultima evidenza suggerisce che le fasi di accelerazione nell'area urbanizzata in scarpata possono concorrere con fasi di accelerazione delle masse in frana nella parte di valle del versante, se pur con valori diversi di accelerazione. La validazione di tale ipotesi, sinora basata solo sull'analisi dei PS nell'area del depuratore, non può essere ad oggi supportata da ulteriori evidenze, non essendo presenti altri elementi scatteratori nella parte di valle del versante e non essendo in corso alcun altro monitoraggio in continuo di punti sul versante.

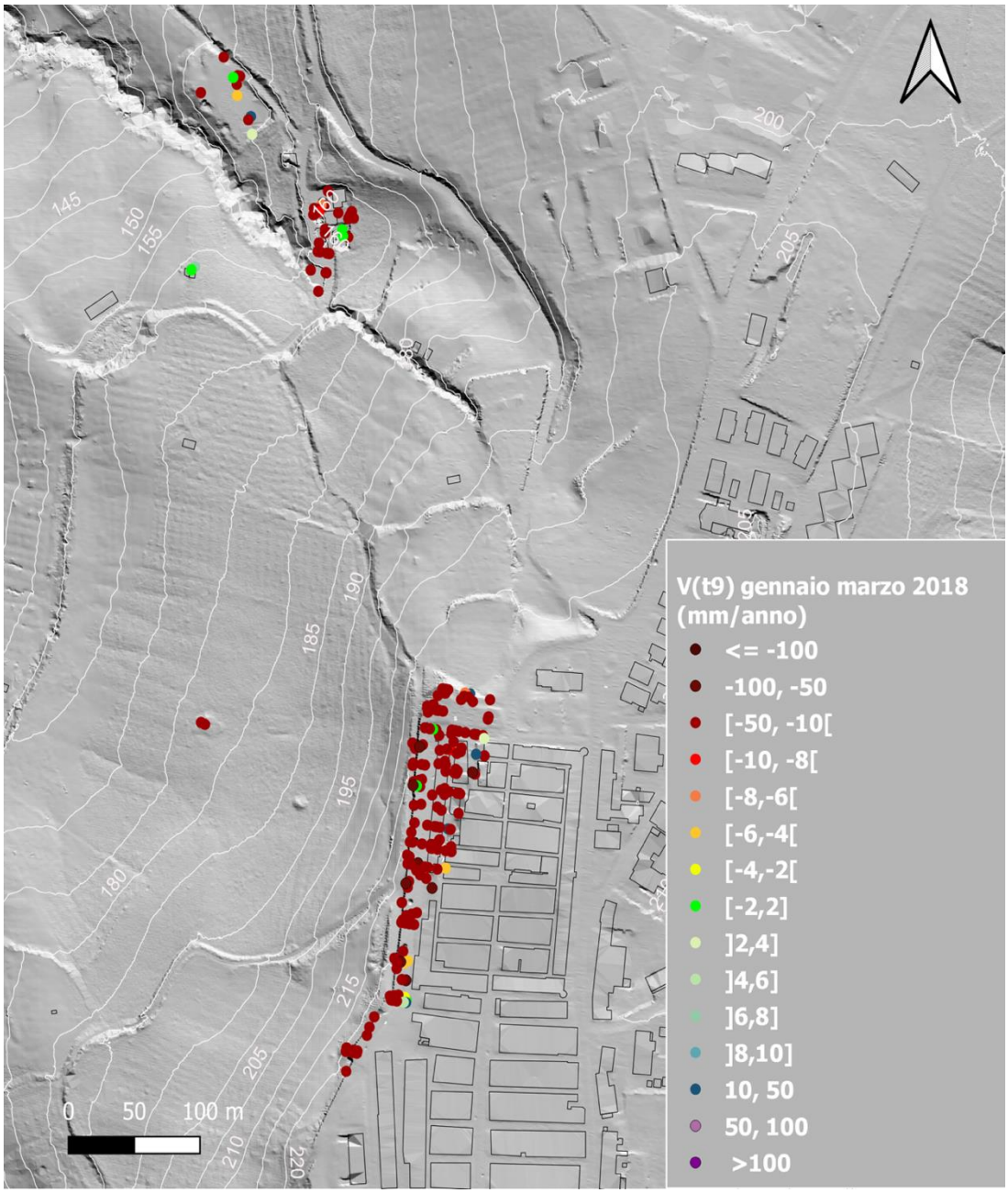


Figura 1.10 Mappa di velocità corrispondente ad una fase caratterizzata da un aumento di velocità di allontanamento dal sensore lungo la LoS, corrispondente ai salti identificati nelle serie storiche.

1.1.3 Analisi multi-geometria

La Figura 1.11 mostra i campi delle componenti di velocità di spostamento, lungo le direzioni Est-Ovest (a) e Verticale (Up-Down) (b), nell'area urbanizzata in scarpata e nell'area sede del depuratore, ottenute combinando le acquisizioni lungo le orbite ascendente e discendente del dataset S1 (analisi multi-geometria). L'analisi multi-geometria consente di superare i limiti connessi alle misure lungo le singole orbite (dove è possibile osservare solamente l'allontanamento o avvicinamento del target rispetto al sensore) e ricavare valori indicativi dello spostamento del singolo scatteratore lungo le direzioni citate, a condizione che lo stesso PS sia identificabile in entrambe le geometrie di acquisizione. Non essendo possibile con certezza identificare lo stesso scatteratore nelle due acquisizioni, a causa della risoluzione del dato e della conseguente incertezza nella

georeferenziazione dei singoli PS, il valore delle componenti E-O e U-D viene generato utilizzando un'area di una certa dimensione all'interno della quale si suppone che tutti i PS selezionati siano sovrapposti. Questo tipo di approccio ha come conseguenza una perdita di risoluzione spaziale. A causa della geometria della direzione quasi polare delle orbite S1, non è possibile inoltre ricavare informazionisulla componente del movimento lungo la direzione Nord-Sud.

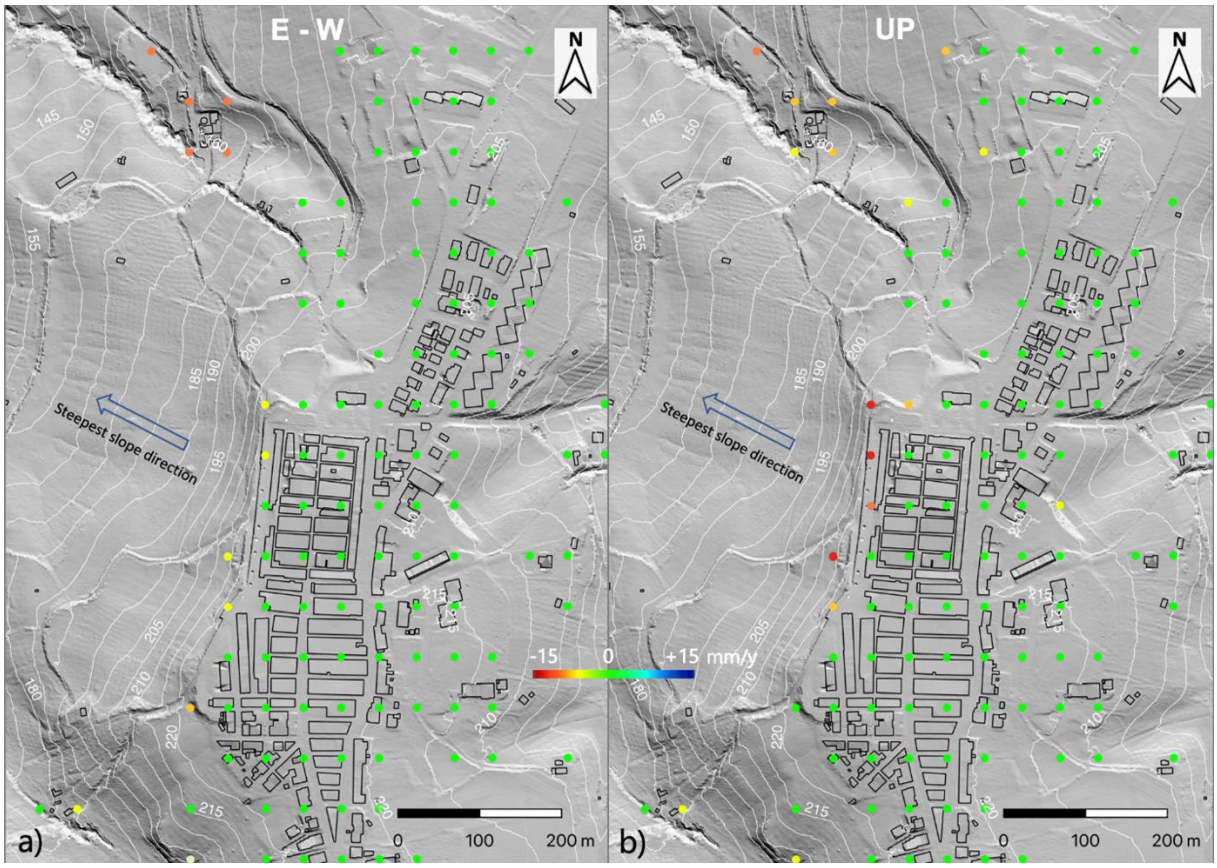


Figura 1.11 Velocità di spostamento lungo le direzioni Est-Ovest (a) e Up-Down (b).

Seppure con i limiti elencati, il movimento nell'area in esame presenta un'orientazione particolarmente favorevole all'applicazione di questotipo di metodologia, poiché la direzione della massima pendenza del versante è circa Ovest-Nord Ovest, per cui è presumibile che i movimenti siano caratterizzati da una componente planimetrica prevalente lungo la direzione Est-Ovest.

Le mappe di velocità ottenute indicano come la componente verticale del movimento nella parte sommitale del versante, pari a circa -12 mm/anno lungo Via dei Martiri di Via Fani (Figura 1.11 b, PS in rosso), sia quella dominante, mentre velocità inferiori, pari a circa -3 mm/anno, caratterizzano la componente in direzione orizzontale. Di contro, l'area del depuratore è caratterizzata da una componente orizzontale della velocità (V_E di circa -7 mm/anno Figura 1.11 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**a, PS arancioni) dominante. Questa osservazione influenza l'interpretazione della dinamica delle masse in movimento nel pendio, discussa alla fine del presente capitolo.

1.1.3.1 Misure a terra e confronto con i risultati dell'analisi MTInSAR

Ad aprile 2021, con l'obiettivo di valutare in maniera tempestiva l'evoluzione del dissesto nell'area urbanizzata,

è stato formalizzato un accordo tra il Gruppo di Geomatica del DICATECh, sotto la responsabilità scientifica dei Proff. Eufemia Tarantino ed Alberico Sonnessa, (rif. Accordo ex art.15 "STUDIO E GESTIONE DEL MONITORAGGIO GEOMATICO IN TEMPO REALE DELL'AREA IN FRANA DEL VERSANTE OCCIDENTALE PRESSO L'ABITATO DI CHIEUTI (FG)" del 8 Luglio 2021), a seguito del quale è stato installato un sistema di monitoraggio basato su sensori geomatici secondo lo schema illustrato in Figura 1.12.

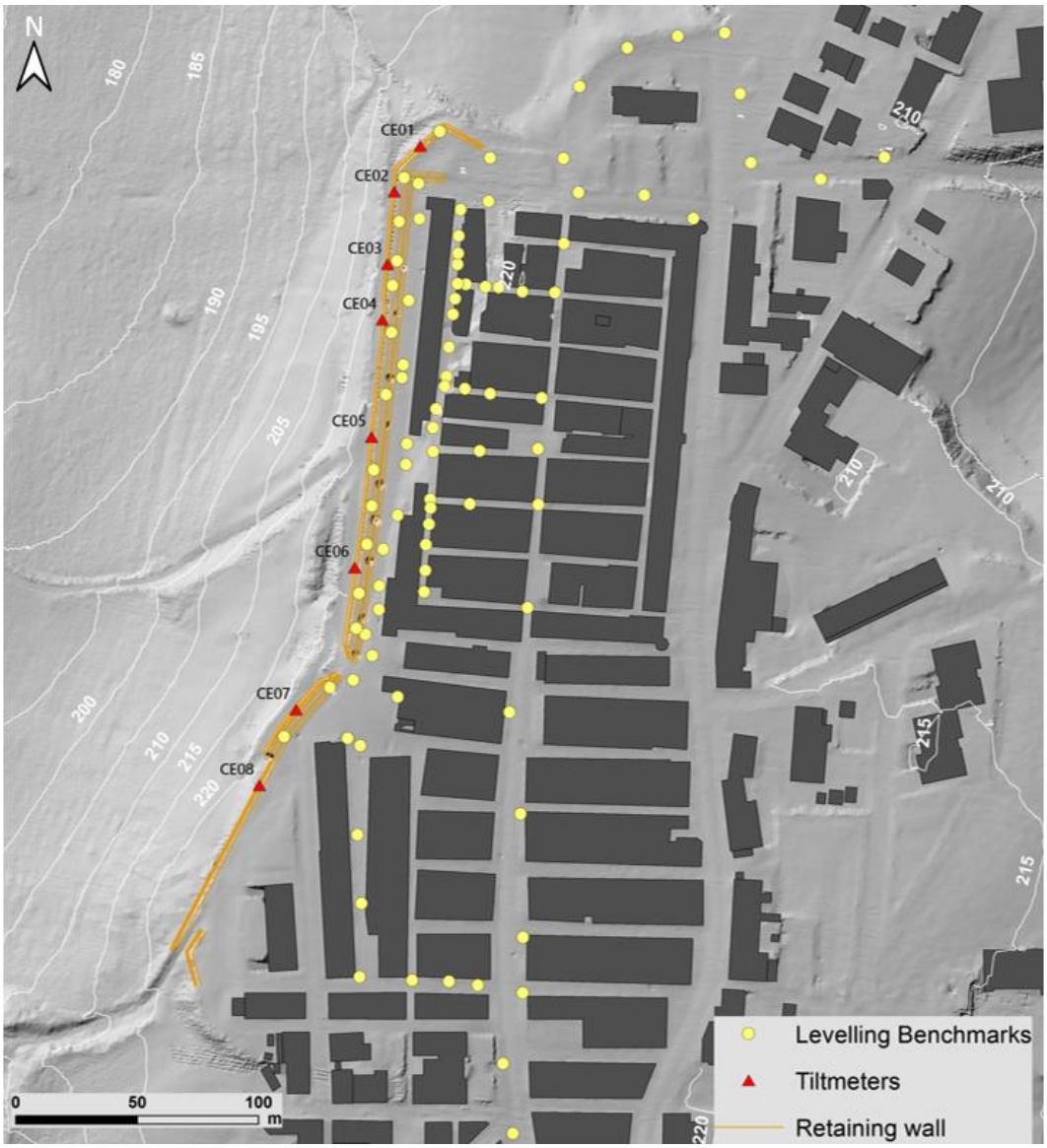


Figura 1.12 Sistema per il monitoraggio geomatico dell'area urbana.

Il sistema comprende:

- 90 capisaldi di livellazione distribuiti nel centro storico, deputati al monitoraggio della componente verticale dello spostamento, le cui differenze di quota vengono rideterminate circa una volta al mese;
- 8 tiltmetri posizionati sul muro di contenimento, che misurano l'inclinazione della struttura con una frequenza di acquisizione pari ad una misura/ora.

In Figura 1.6 i triangoli in verde mostrano le serie storiche di livellazione relative ad alcuni capisaldi posti in vicinanza degli scatteratori A-I. Poiché la componente verticale del movimento è quella dominante, come dedotto dall'analisi multi-geometria, gli spostamenti lungo la LOS e gli spostamenti puramente verticali

risultano differire di poco e saranno considerati confrontabili ai fini dell'interpretazione della distribuzione spazio-temporale dello spostamento.

Le osservazioni da terra appaiono confermare i trend rilevati dalla tecnica MTInSAR. La fase di accelerazione riconosciuta dal SAR è infatti chiaramente individuata anche dalle osservazioni a terra e, analogamente, il periodo caratterizzato da velocità di spostamento pressoché costanti è desumibile anche dalle misurazioni da terra.

I risultati delle misure di livellazione, relativi al periodo 14 Maggio 2021 – 6 Dicembre 2022, sono mostrati nelle mappe di spostamento dei capisaldi e delle stadie in Figura 1.13 e Figura 1.14 rispettivamente, in termini di variazione di quota rispetto ad un caposaldo preso come riferimento (caposaldo1) posto in zona stabile non interessata dal fenomeno franoso. I valori negativi indicano abbassamenti lungo la direzione della verticale. I capisaldi 4-5-6-50-51 sono stati danneggiati e successivamente ripristinati in posizione differente, da cui i valori anomali in figura.

Nella Figura 1.15 e nella Figura 1.16 vengono mostrate le mappe di velocità di spostamento dei capisaldi e delle stadie posizionate sugli edifici come indicato nelle planimetrie. Le serie temporali relative ai singoli capisaldi/stadie vengono riportati in Appendice.

L'analisi degli spostamenti e delle velocità dei capisaldi confermano l'estensione e l'entità, in termini di parametri cinematici, del campo di spostamenti caratterizzato in precedenza con i dati MTInSAR. Le misure a terra avvalorano inoltre quanto dedotto dall'analisi combinata multi-geometria per la componente verticale, e cioè l'aumento degli spostamenti e delle velocità lungo la direzione E-O, muovendosi dalla scarpata SR2 verso il muro di contenimento. Il dato di livellazione fa inoltre emergere un ulteriore elemento legato all'estensione del dissesto, evidenziando la presenza di cedimenti anche nella parte nord dell'abitato, evidenti nella zona dell'edificio del Comune (caposaldo 43). Gli spostamenti e la velocità di spostamento rilevata per il caposaldo 11 sembrano inoltre indicare una retrogressione del fenomeno verso Est nella parte meridionale dell'area.

L'analisi delle misure rilevate con le stadie evidenzia come gli edifici siano interessati da differenziali di spostamento e velocità.

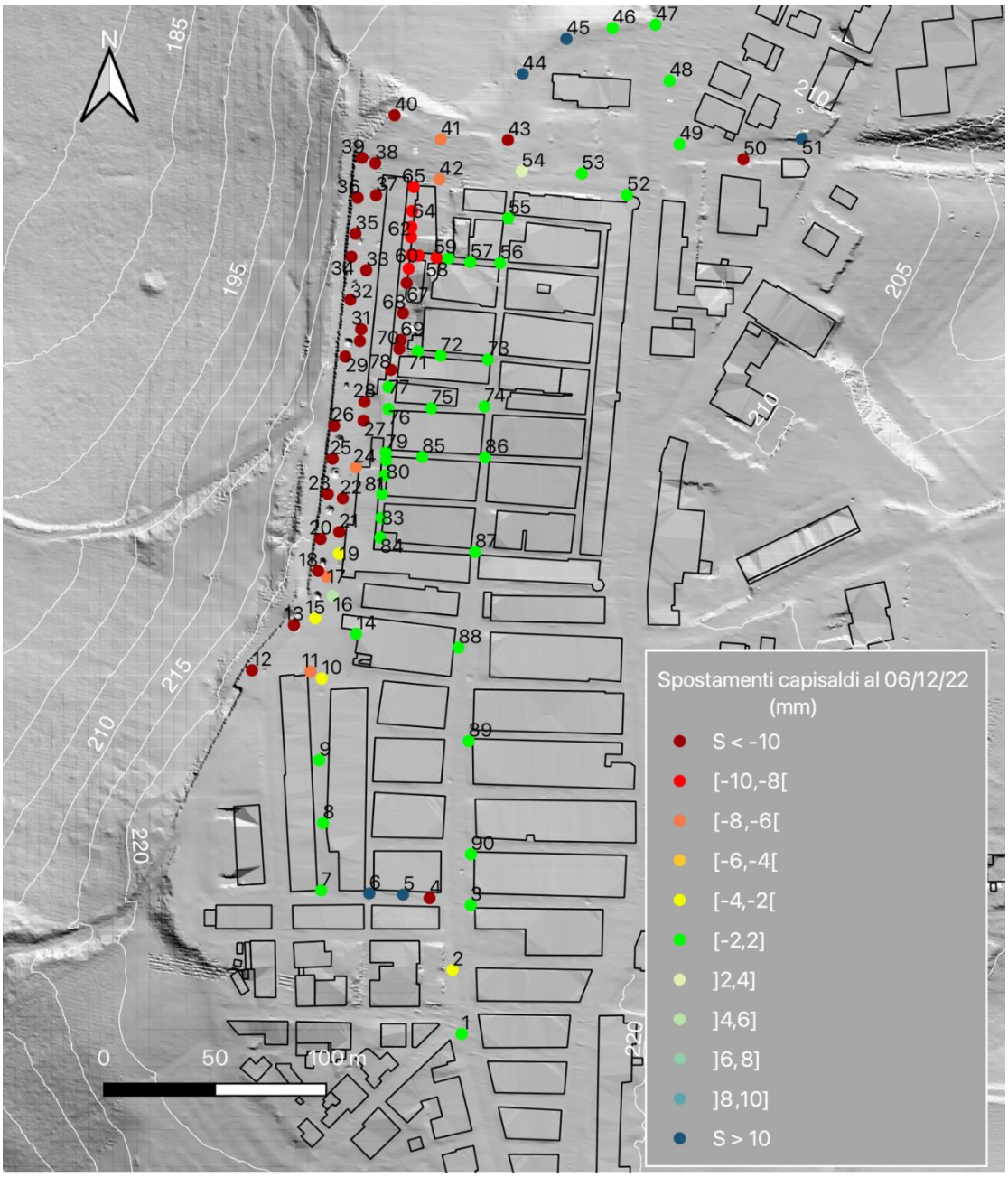


Figura 1.13 Spostamenti dei capisaldi di livellazione nel periodo 14 Maggio 2021 – 6 Dicembre 2022.



Figura 1.14 Spostamenti delle stadie a muro nel periodo 14 Maggio 2021 – 6 Dicembre 2022.

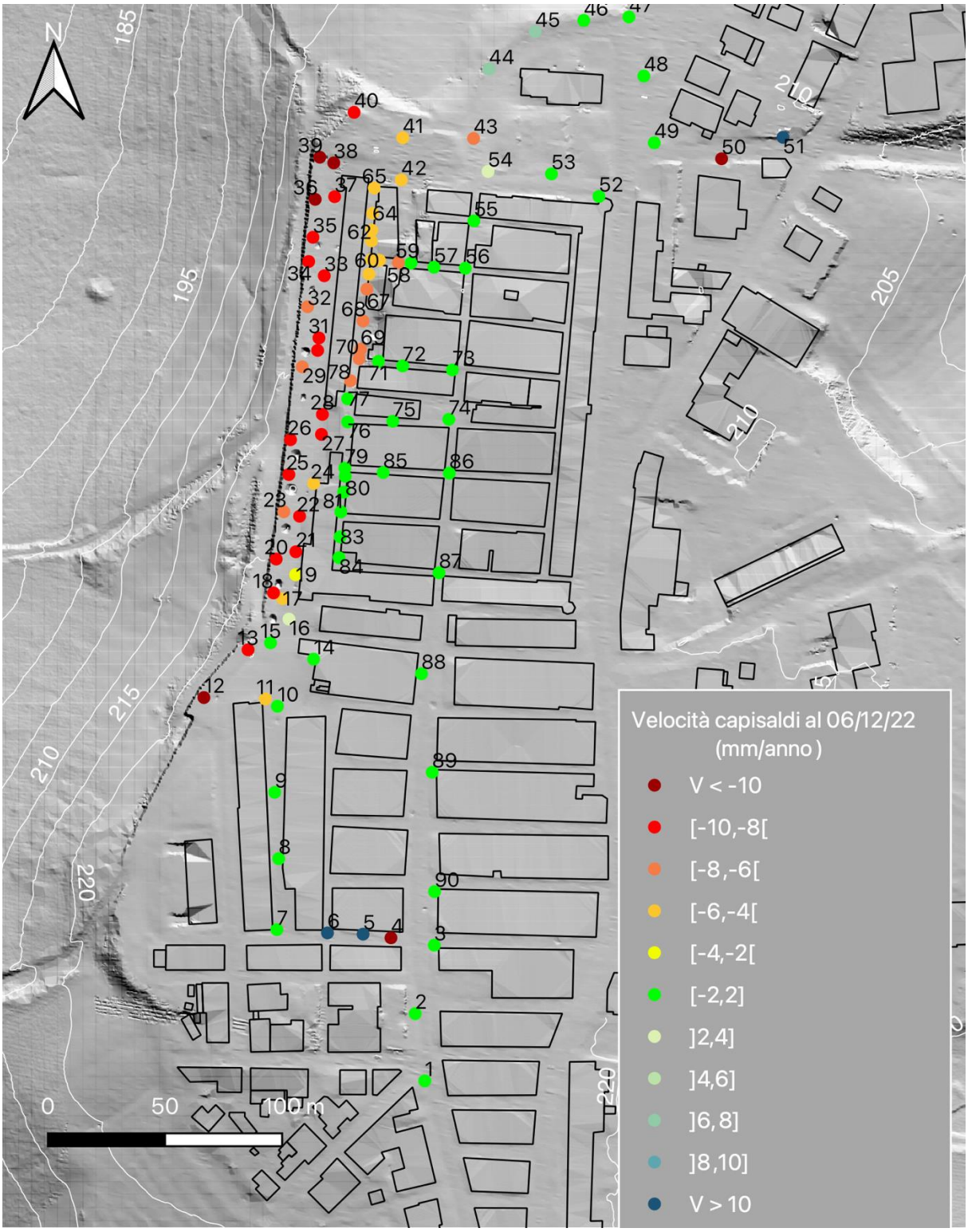


Figura 1.15 Velocità di spostamento dei capisaldi di livellazione nel periodo 14 Maggio 2021 – 6 Dicembre 2022



Figura 1.16 Velocità di spostamento delle stadie a muro nel periodo 14 Maggio 2021 – 6 Dicembre 2022

I tiltmetri biassiali acquisiscono il valore dell'angolo di inclinazione Δθ in direzione trasversale (canale ch2) e longitudinale (ch3) alla struttura di contenimento (secondo le convenzioni indicate in Figura 1.17**)**, in termini di variazione rispetto al valore di 0 relativo alla prima misura (settembre 2021). Ogni sensore registra inoltre il valore della temperatura su un terzo canale (ch1).

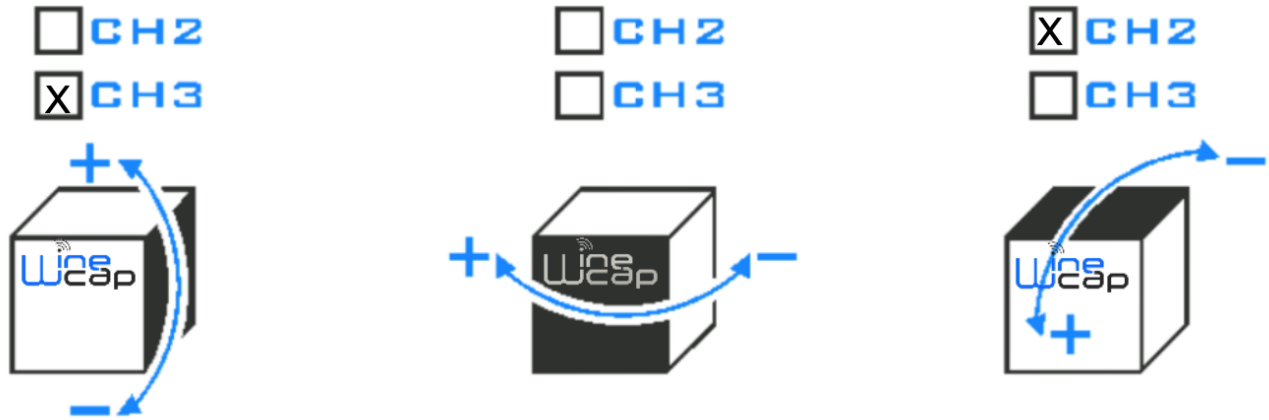


Figura 1.17 Schema di acquisizione dei tiltmetri biassiali installati sul muro di contenimento lungo Via dei Martiri di Via Fani.

Tilt CE01 – CE02

Il Δθ misurato tra il 4 Settembre 2021 e il 13 Febbraio 2023 dai tiltmetri CE01 (Figura 1.18Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.) e CE02 (Figura 1.19Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.), collocati nella parte nord della struttura, indica fluttuazioni legate principalmente alle variazioni termiche. Gli scostamenti cumulati che si evidenziano intorno al 4 febbraio sono, alla data della scrittura, molto contenuti (intorno al 1/1000 di grado).

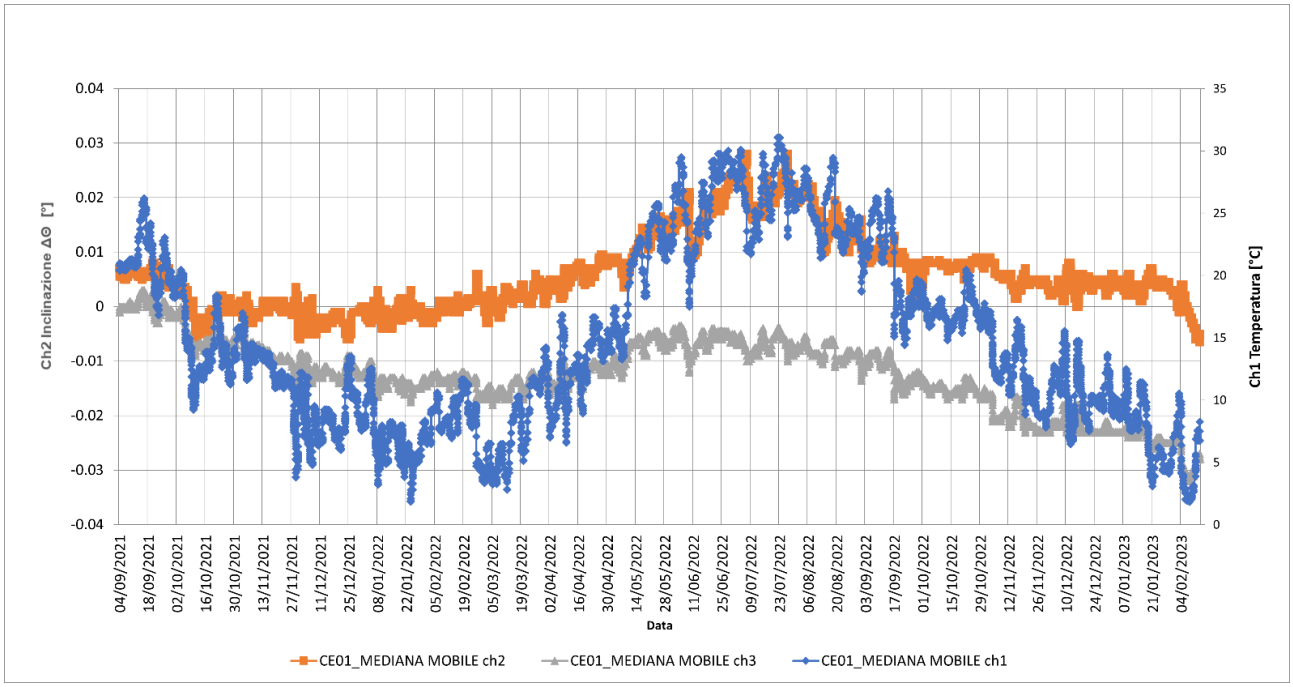


Figura 1.18 Variazione di inclinazione in direzione perpendicolare (ch2, approssimativamente lungo la direzione E-O) e trasversale al muro di contenimento (ch3, approssimativamente in direzione N-S) misurata dal tiltmetro CE01.

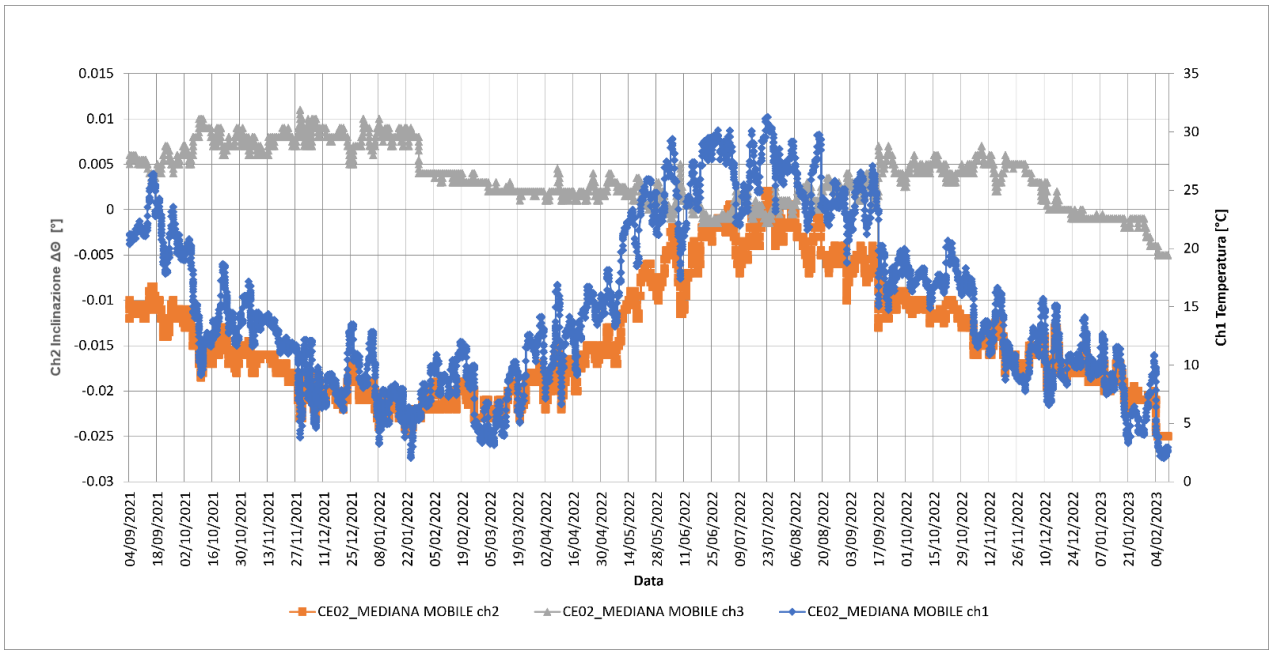


Figura 1.19 Variazione di inclinazione in direzione perpendicolare (ch2, approssimativamente lungo la direzione E-O) e trasversale al muro di contenimento (ch3, approssimativamente in direzione N-S) misurata dal tiltmetro CE02.

Tilt CE03 – CE04

I sensori CE03 e CE04, posti rispettivamente a nord e sud della lesione presente lungo il giunto del muro, discussa nella I Relazione di II Fase (Figura 2.6.9 di detto report) e mostrata in Figura 1.20Errore. L'origine riferimento non è stata trovata., indicano un incremento del Δθ (rotazione verso valle) marcato in direzione perpendicolare alla struttura, a partire dalla fine del mese di Gennaio 2023 o inizio del mese di Febbraio 2023 (Figura 1.21-Figura 1.24Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.). L'aumento di inclinazione, in termini relativi, è maggiore per il tiltmetro CE03 (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.circa 0.06°, corrispondenti a circa 0.016 m ipotizzando una rotazione con perno al piede dei pali di fondazione del muro). La fase di accelerazione sembra però essere già terminata per il CE04, che ad oggi registra uno stato stazionario. Va evidenziato che i tiltmetri CE03 e CE04 si collocano nel settore B evidenziato in precedenza, inErrore. L'origine riferimento non è stata trovata. Figura 1.3, come sede dei PS a più elevata velocità. Tale settore si colloca a ridosso delle scarpate dei corpi secondari S2 e S2A, entrambi indicati nella carta geomorfologica in Figura 1.25che configura un aggiornamento della carta geomorfologica della I Relazione di II Fase (Figura 6.4.6). Le scarpate dei processi S2 e S2A sono riconosciute come porzioni tra le più attive della più ampia scarpata SR1 (Figura 1.25), ad Ovest della scarpata principale SR2. Appare dunque che i dati rilevati dai tiltmetri CE03 e CE04, combinati con i dati dei rilievi geomatici da satellite, o altrimenti acquisiti tramite livellazione di superficie, stiano mettendo in evidenza una più significativa attività di questa porzione della scarpata SR1, connessa all'attività delle scarpate secondarie dei corpi S2 e S2A, che motiva a far ritenere la stabilizzazione di tale porzione del versante tra gli obiettivi prioritari nel contesto dell'articolazione degli interventi da mettersi in atto per la mitigazione del rischio sul versante.

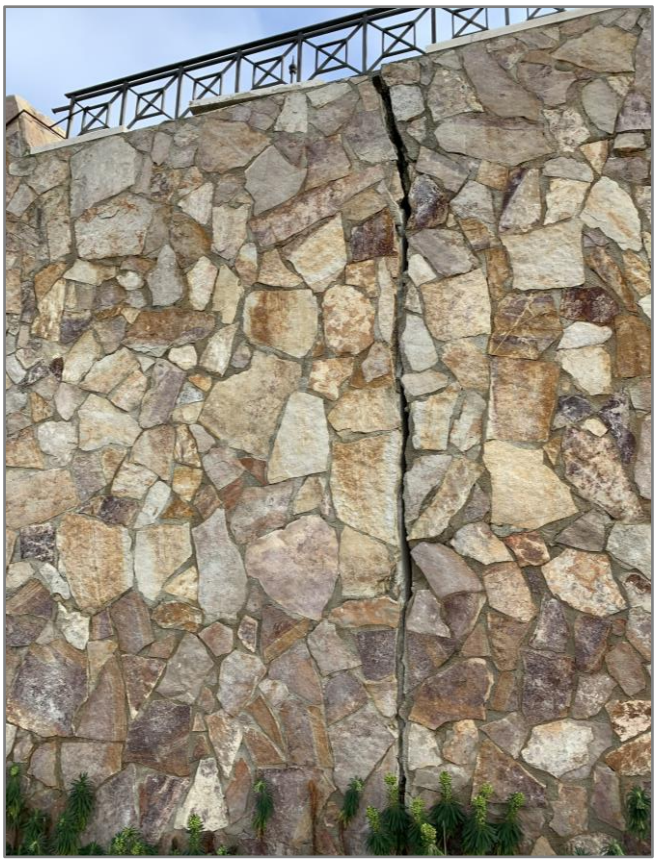


Figura 1.20 Lesione sulla struttura di contenimento tra i tilt CE03 e CE04, in data 2 Febbraio 2021

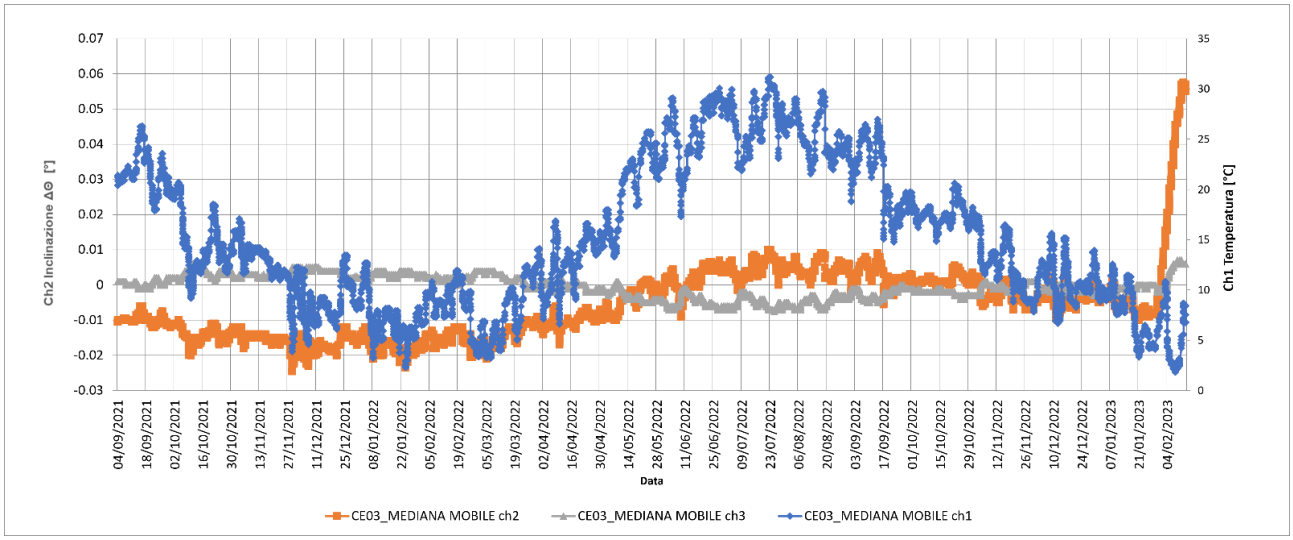


Figura 1.21 Variazione di inclinazione in direzione perpendicolare (ch2, approssimativamente lungo la direzione E-O) e trasversale (ch3, approssimativamente in direzione N-S) al muro di contenimento misurata dal tiltmetro CE03.

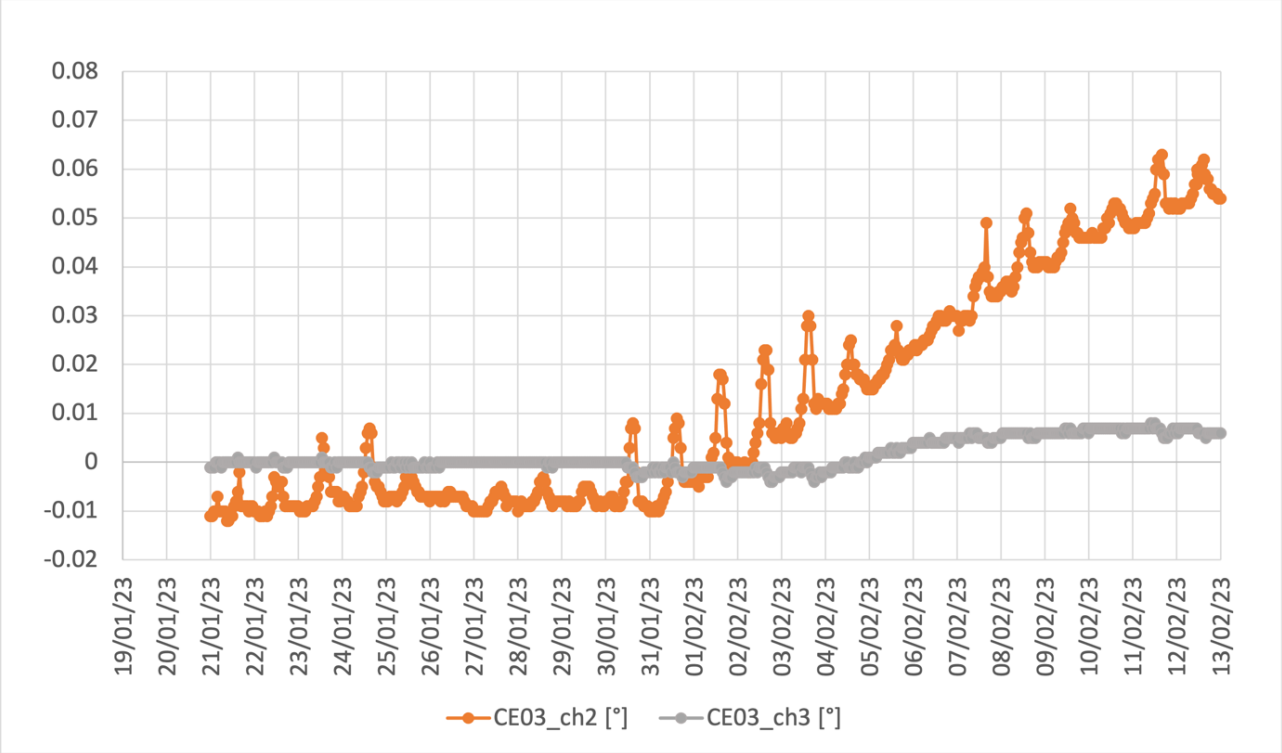


Figura 1.22 Variazione di inclinazione in direzione perpendicolare (ch2) e trasversale (ch3) al muro di contenimento misurata dal tiltmetro CE03 tra il 21 Gennaio e il 13 Febbraio 2023.

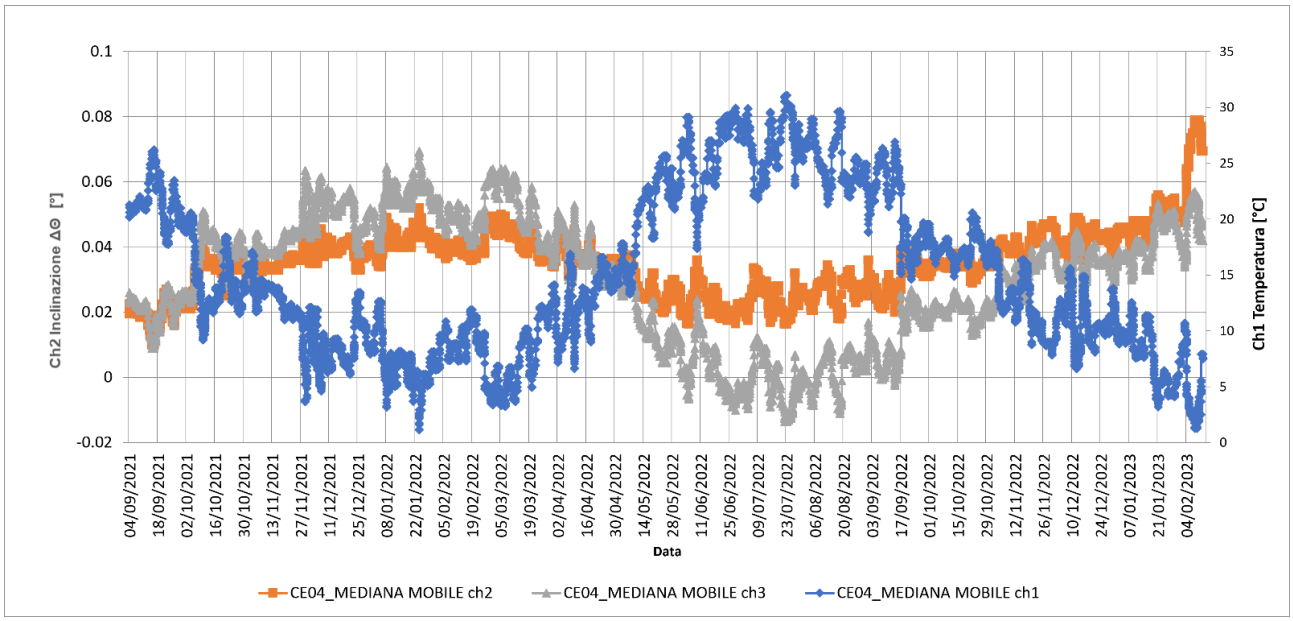


Figura 1.23 Variazione di inclinazione in direzione perpendicolare (ch2, approssimativamente lungo la direzione E-O) e trasversale (ch3, approssimativamente in direzione N-S) al muro di contenimento misurata dal tiltmetro CE04.

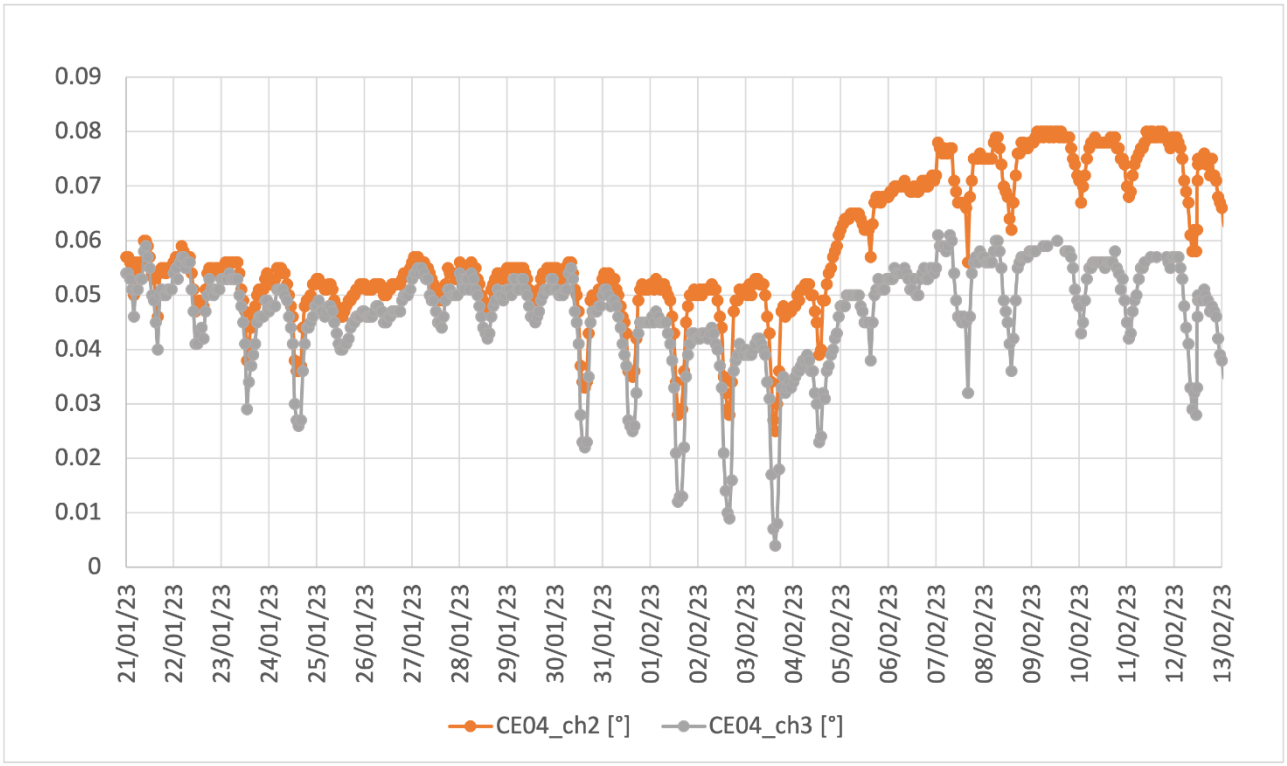


Figura 1.24 Variazione di inclinazione in direzione perpendicolare (ch2) e trasversale (ch3) al muro di contenimento misurata dal tiltmetro CE04 tra il 21 Gennaio e il 13 Febbraio 2023.

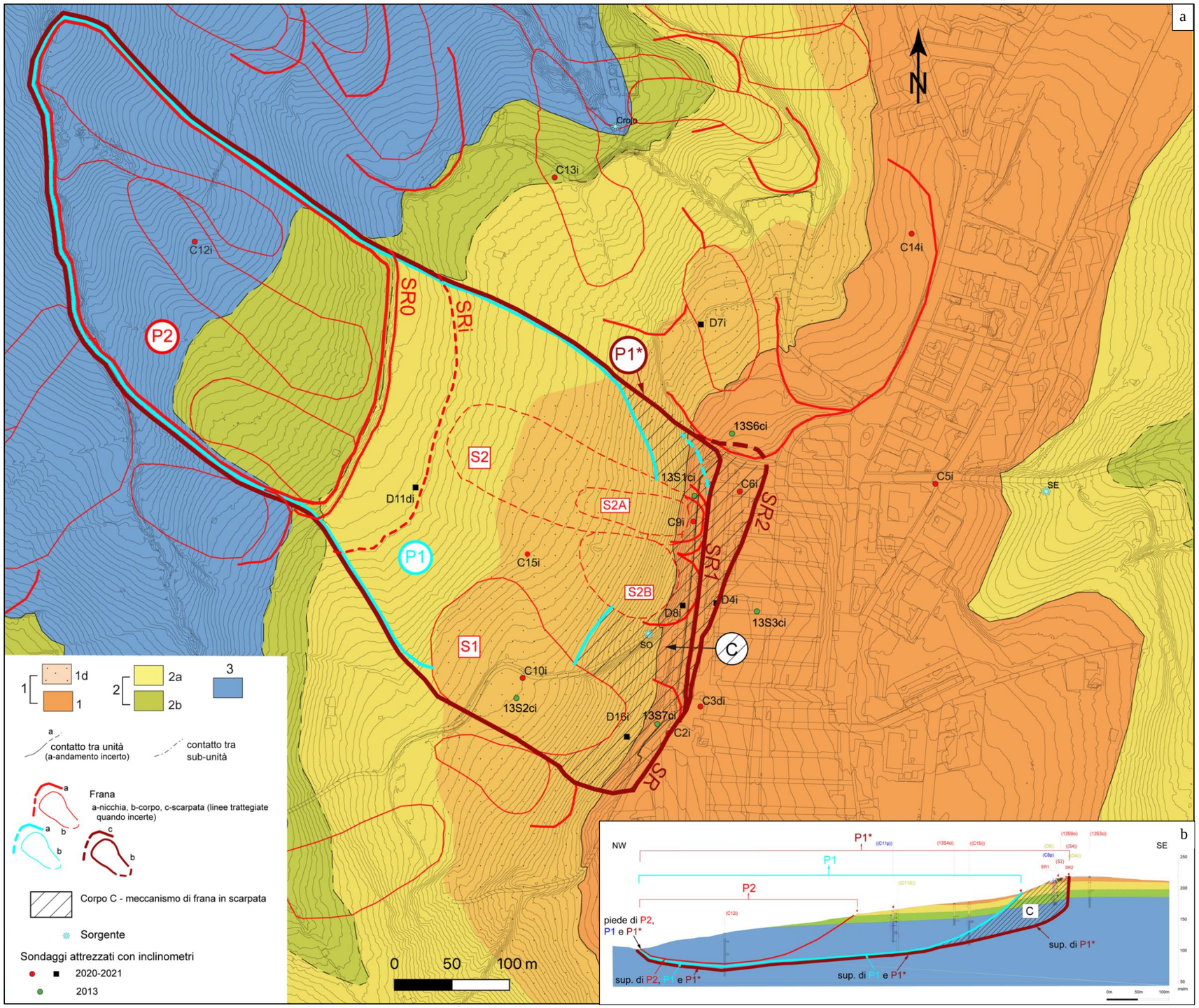


Figura 1.25 Carta geomorfologica aggiornata (a), funzionale ad evidenziare i principali corpi franosi P1, P1, C e P2, discussi nel dettaglio nel §1.2 e schematizzati nella sezione in (b).*

Tilt CE05 – CE06

I sensori CE05 (Figura 1.26Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.) e CE06 (Figura 1.27Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.), collocati nel tratto centrale della struttura di contenimento, non evidenziano valori anomali di Δθ. Analogamente ai sensori CE01-CE02, le variazioni registrate sul lungo periodo sembrano essere influenzate dalla temperatura.

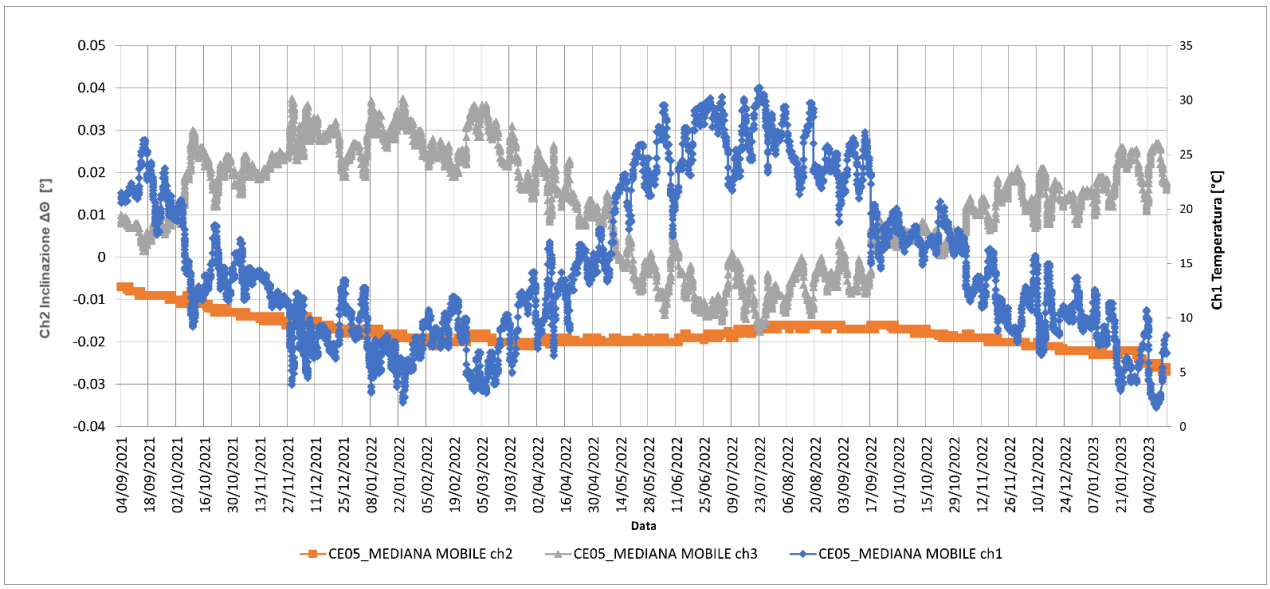


Figura 1.26 Variazione di inclinazione in direzione perpendicolare (ch2, approssimativamente lungo la direzione E-O) e trasversale (ch3, approssimativamente in direzione N-S) al muro di contenimento misurata dal tiltmetro CE05.

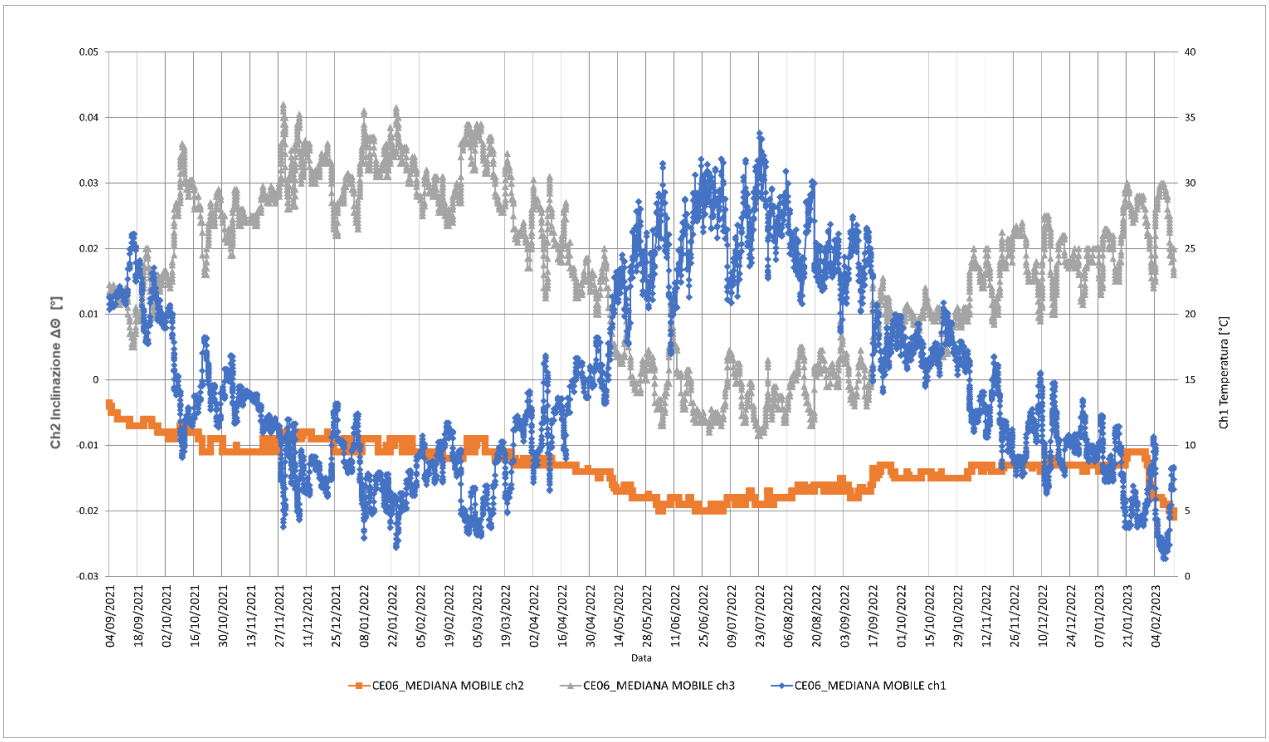


Figura 1.27 Variazione di inclinazione in direzione perpendicolare (ch2, approssimativamente lungo la direzione E-O) e trasversale (ch3, approssimativamente in direzione N-S) al muro di contenimento misurata dal tiltmetro CE06.

Tilt CE07 – CE08

Di seguito vengono mostrati gli andamenti misurati dai tiltmetri CE07 (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.Figura 1.28 -Figura 1.29Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.) e CE08 (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.Figura 1.30Figura 1.31Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.), collocati sulla struttura di contenimento costruita nella parte meridionale del ciglio del versante, in una fase precedente rispetto alla costruzione della struttura di contenimento della parte nord.

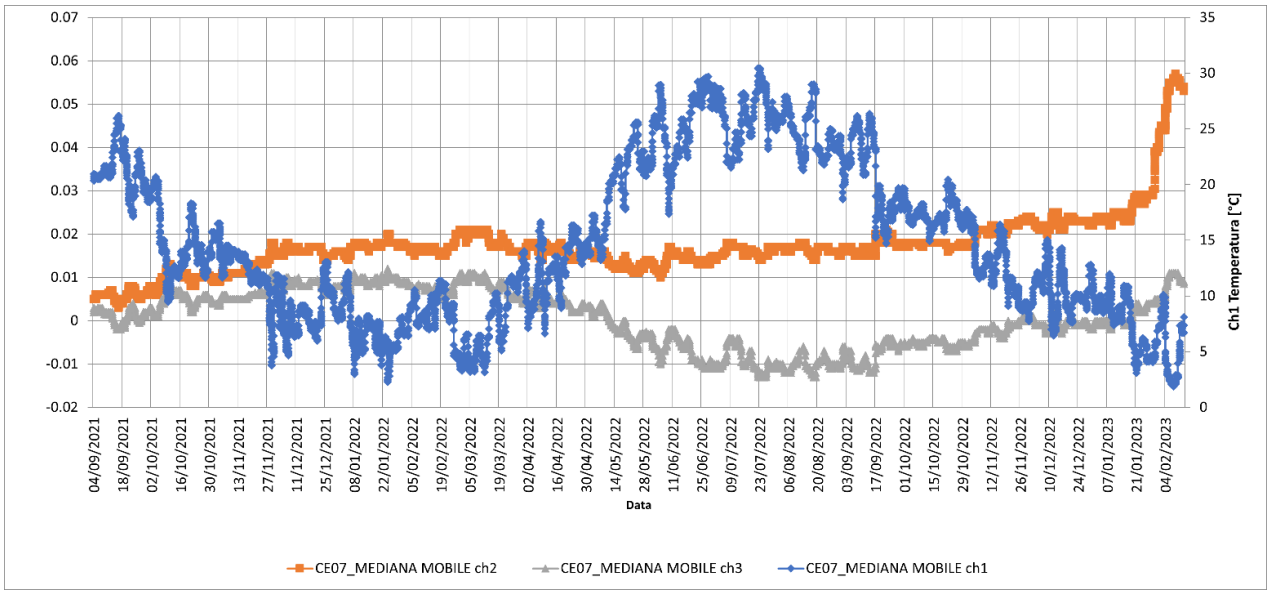


Figura 1.28 Variazione di inclinazione in direzione perpendicolare (ch2, approssimativamente lungo la direzione E-O) e trasversale (ch3, approssimativamente in direzione N-S) al muro di contenimento misurata dal tiltmetro CE07.

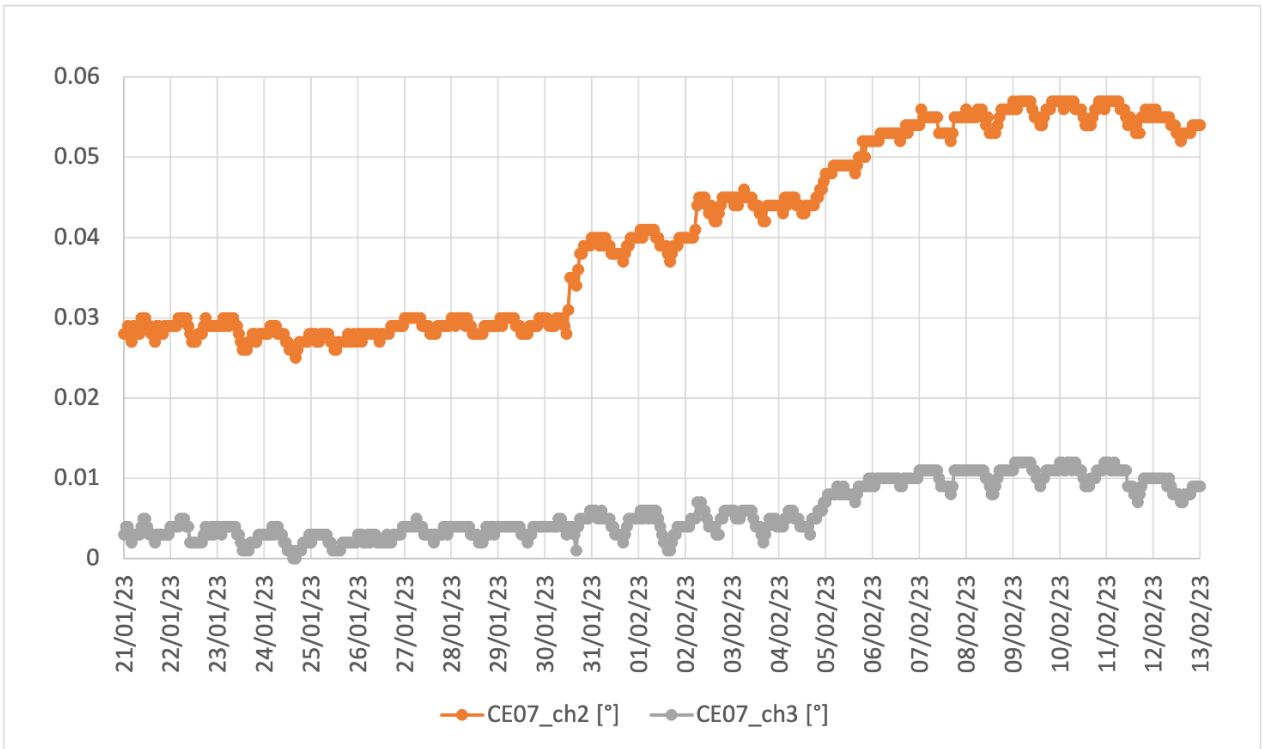


Figura 1.29 Variazione di inclinazione in direzione perpendicolare (ch2) e trasversale (ch3) al muro di contenimento misurata dal

tiltmetro CE07 tra il 21 Gennaio e il 13 Febbraio 2023.

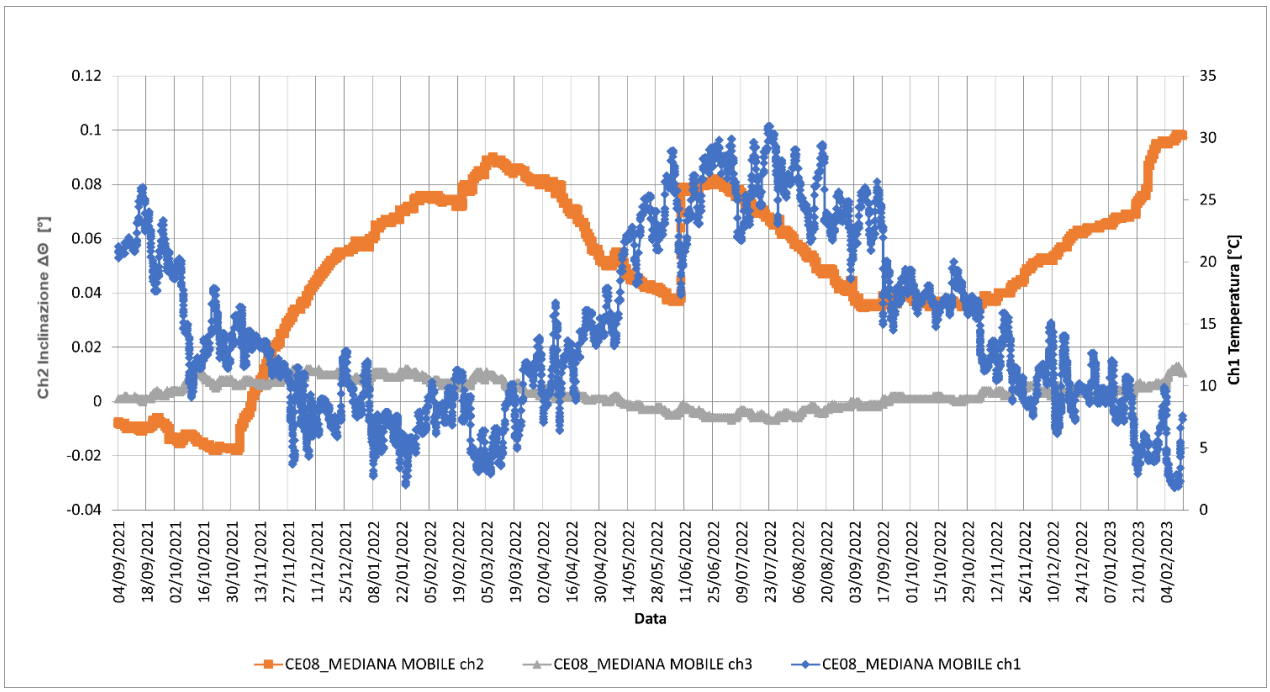


Figura 1.30 Variazione di inclinazione in direzione perpendicolare (ch2, approssimativamente lungo la direzione E-O) e trasversale (ch3, approssimativamente in direzione N-S) al muro di contenimento misurata dal tiltmetro CE08.

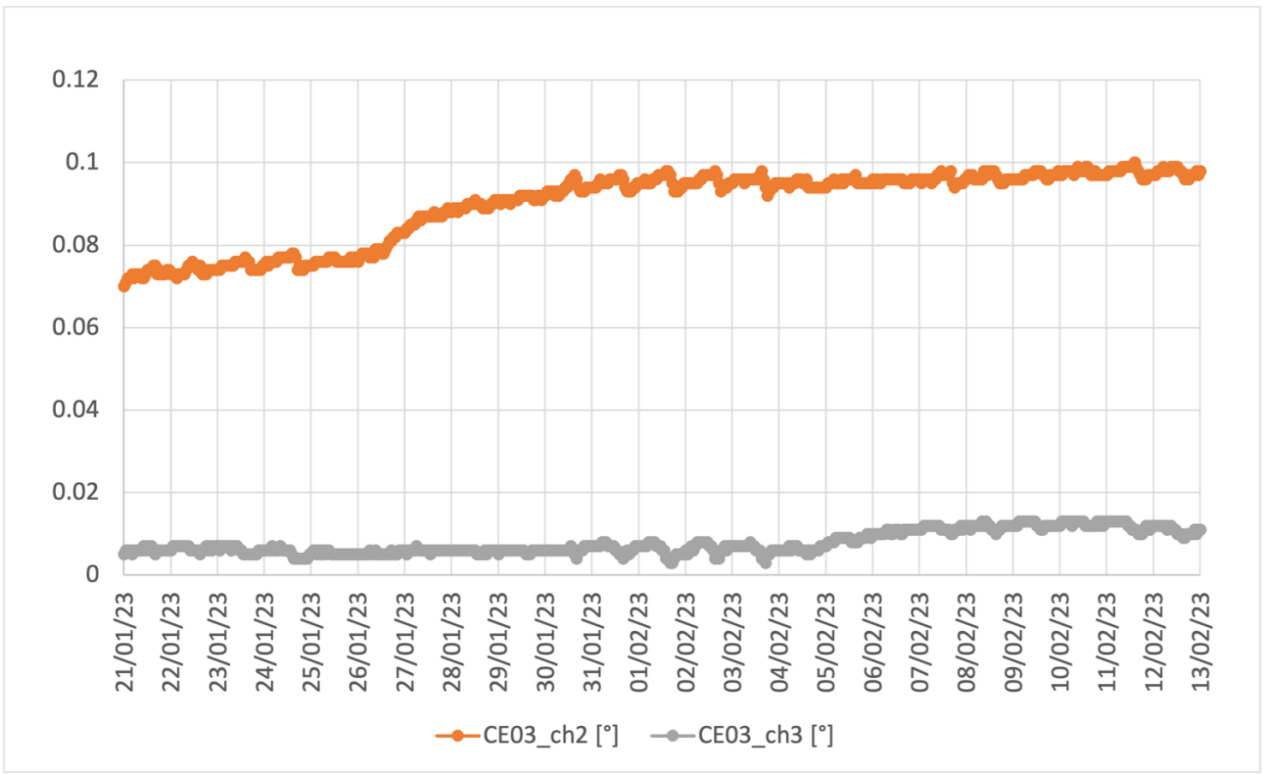


Figura 1.31 Variazione di inclinazione in direzione perpendicolare (ch2) e trasversale (ch3) al muro di contenimento misurata dal tiltmetro CE07 tra il 21 Gennaio e il 13 Febbraio 2023.

Il sensore CE07 registra, dopo una fase di lenta rotazione verso valle, una accelerazione nella rotazione, anche

in questo caso marcata a partire dal 31 Gennaio 2023 (fino a circa 0.06°, Figura 1.28 -Figura 1.29Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.), come per i tiltmetri CE03 e CE04. L'adiacente sensore CE08 continua a mostrare maggiori rotazioni rispetto alla misura iniziale (0.1°, corrispondenti a circa 0.026 m,(Figura 1.30Figura 1.31Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.), con un andamento meno regolare. Anche i tiltmetri CE07 e CE08 si collocano in una scarpata secondaria interna alla porzione meridionale della scarpata principale SR, prosieguo verso sud della scarpata SR1 (Figura 1.25). Tale scarpata secondaria è connessa al processo franoso indicato come S1 nella Figura 1.25. La concomitanza delle accelerazioni dei tiltmetri CE03, CE04 nella parte nord, corrispondenti come detto alle scarpate secondarie dei processi franosi S2 e S2A, e delle accelerazioni dei tiltmetri CE07 e CE08, nella parte sud e corrispondenti alla scarpata di un altro processo franoso localizzato, S1, suggerisce che tali accelerazioni possano essere parte di una riattivazione complessiva dell'attività dell'intera scarpata, denominata SR a sud e che si sdoppia in SR1 e SR2 a nord. La plausibilità di una tale ipotesi si può basare sul fatto che risulta verosimile che all'interno della riattivazione complessiva di un'ampia scarpata, masse più instabili e meno profonde secondarie possano assumere velocità più elevate di quelle profonde, venendo coinvolte in movimenti relativi rispetto alle masse in deformazione più profonde.

1.1.4 Correlazione degli spostamenti rilevati in superficie con le precipitazioni

L'ipotesi dell'esistenza di una correlazione tra le azioni climatiche e le ricorrenti accelerazioni degli spostamenti sin qui messe in evidenza è stata esplorata attraverso un confronto empirico tra le serie temporali delle altezze di pioggia e gli andamenti nel tempo degli spostamenti. Ciò poiché le resistenze nel pendio dipendono dalle altezze piezometriche, a loro volta connesse all'infiltrazione nel tempo delle acque di pioggia lungo l'estradosso del versante, con portate pari alla differenza tra l'intensità di pioggia e quella di evapotraspirazione, entrambe dipendenti dalle condizioni climatiche e dalle caratteristiche idro-meccaniche dei terreni. Generalmente, spostamenti superficiali in pendii sede di terreni fini possono essere connessi all'infiltrazione delle piogge sul breve periodo (alcune settimane), quindi all'infiltrazione cumulata in periodi dai 10 ai 60 giorni (piogge cumulate). Un periodo più lungo (90-180 giorni) è necessario per incidere sulla stabilità di corpi di frana profondi.

Pertanto, la possibile connessione tra infiltrazioni di pioggia e spostamenti è stata valutata confrontando l'andamento delle cumulate di pioggia sui 30, 60, 90 e 120 giorni, con le serie storiche di spostamento rilevate da satellite, S1, per il punto A (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.Figura 1.5 - Figura 1.32Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.), situato nella parte meridionale di Via dei Martiri di Via Fani e caratterizzato da un'elevata velocità di allontanamento lungo la LoS.

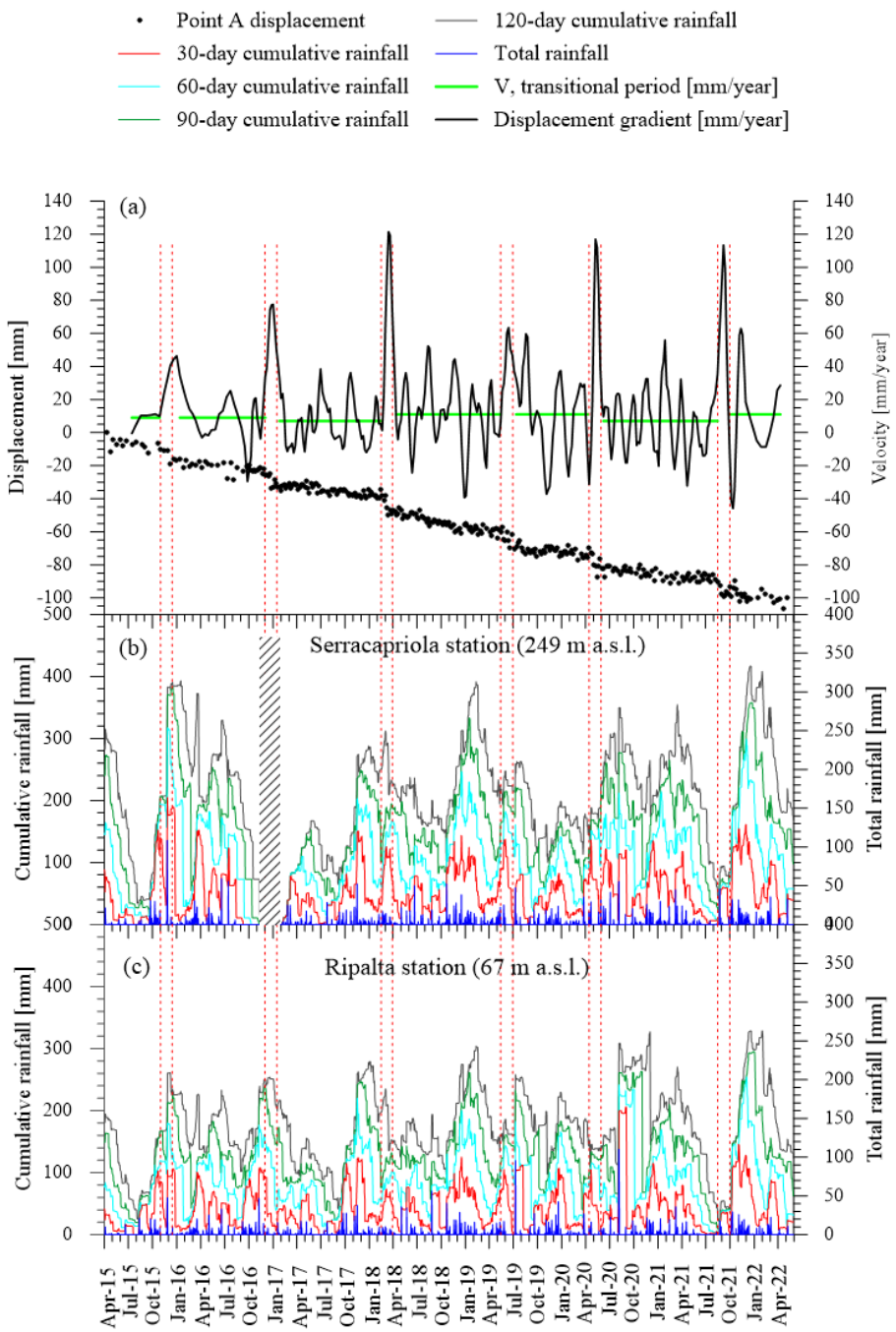


Figura 1.32 (a) Confronto tra la serie temporale di spostamento del punto A e le velocità corrispondenti, con le distribuzioni delle cumulate di pioggia (da 30 a 120 giorni) calcolate dai dataset acquisita dalle stazioni meteo di (b) Serracapriola e (c).

In Figura 1.32Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. viene mostrata l'analisi degli spostamenti e delle velocità di spostamento per il punto A. I risultati, presentati in Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.Figura 1.32 a con il segno positivo evidenziano picchi di velocità di circa 120 mm/anno durante la fase di accelerazione, mentre il periodo di transizione tra due accelerazioni è caratterizzato da velocità pressoché costanti, comprese tra 7 e 13 mm/anno, con un valore medio di circa 10 mm/anno.

A causa dell'iniziale mancanza di acquisizioni S1 tra Novembre e Dicembre 2015, la corrispondenza con la velocità di picco non è identificata con precisione, poiché il tempo di rivisitazione è diventato pari a 6 giorni solo dopo l'introduzione del satellite S1B nel settembre 2016.

Le precipitazioni totali e le cumulate, acquisite dalle stazioni meteorologiche di Serracapriola (249 m s.l.m.) e Ripalta (64 m s.l.m.), situate rispettivamente a 5 km e 10 km da Chieuti, sono mostrate in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Figura 1.32 b e c. I dati tra fine agosto 2016 e gennaio 2017 non sono stati acquisiti dalla stazione di Serracapriola (area grigia in figura). L'analisi delle serie temporali delle precipitazioni totali e cumulate evidenzia la stessa tempistica, ma diversa ampiezza, maggiore a Serracapriola rispetto a Ripalta, come atteso vista la maggiore altitudine della prima.

Il confronto fra le serie di spostamento e le cumulate di pioggia non fornisce una chiara indicazione di corrispondenza tra i picchi delle cumulate a 90 o 120 giorni di pioggia e le accelerazioni. Una migliore correlazione sembra evidenziarsi tra i picchi delle precipitazioni cumulate a 30 giorni e le accelerazioni, ad eccezione dell'ultimo arco temporale (settembre-ottobre 2021), che si verifica dopo un lungo periodo secco. Tuttavia, l'accelerazione dello spostamento non coincide necessariamente con i picchi delle cumulate di pioggia a 30 giorni. Quindi non si può ritenere vi sia una correlazione diretta tra valore del picco della cumulata di pioggia sui 30 giorni e accelerazione del movimento. Un'analisi approfondita dell'incidenza del clima sull'equilibrio e stabilità del versante sarà discussa nel capitolo 6 della presente relazione.

1.1.5 Analisi delle misure topografiche lungo l'intero versante

Le misure sono state effettuate da tre pilastrini (indicati con V1, V2, V3, Figura 1.33) materializzati in maniera permanente, verso punti di misura posizionati lungo il versante (in rosso, Figura 1.33) e materializzati da appositi prismi retroriflettori. La misura da differenti posizioni si è resa necessaria per poter stimare ai minimi quadrati la posizione dei punti monitorati attraverso osservazioni ridondanti.

Tabella 1.4 Specifiche della ST utilizzata per le misure trigonometriche sul versante.

Accuratezza sulla misura della distanza (verso prisma)	0.6 mm+ 1 ppm
Accuratezza sulla misura degli angoli (verso prisma)	0,5" (0,15 mgon)
Tempo di Misura Tipico	1.0 s
Capacità di collimazione automatica dei prismi retro-riflettori tramite ATR	

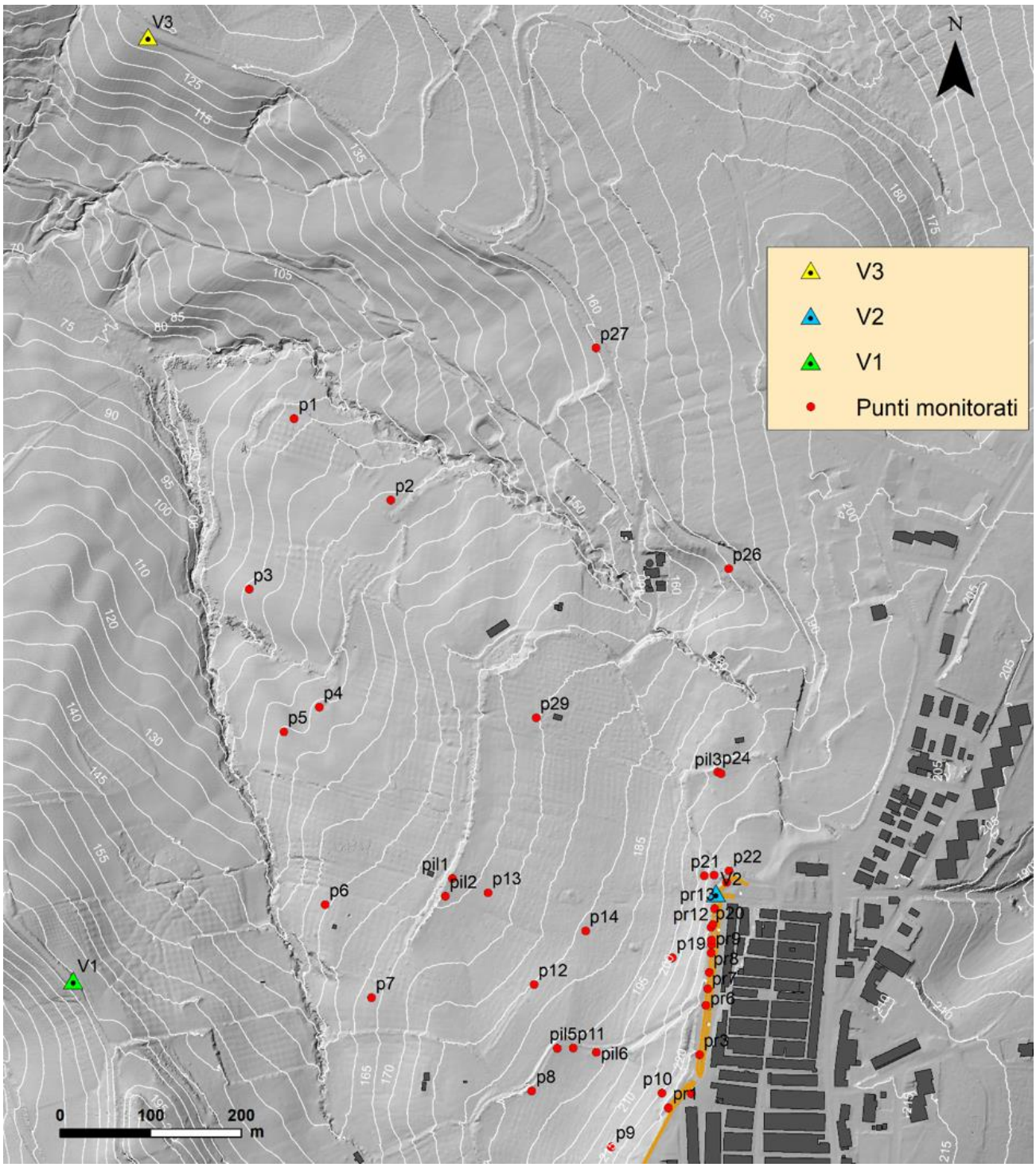


Figura 1.33 Schema di monitoraggio topografico di superficie attivo lungo il versante e a ridosso dei muri di sostegno.

In Figura 1.34 vengono mostrati gli spostamenti plano-altimetrici dei punti monitorati nel periodo 20/10/2021 – 22/12/2022, riportati come vettori sul Lidar rilevato nel 2020 da Apogeo, su cui è stata anche riportata la cartografia geomorfologica aggiornata, equivalente a quella mostrata nella Figura 1.25. I vettori planimetrici sono ingranditi di un fattore 2000 e rispettano la legenda in Figura 1.34. Le variazioni di quota sono riferite al medesimo caposaldo di riferimento utilizzato per la livellazione (caposaldo 1).

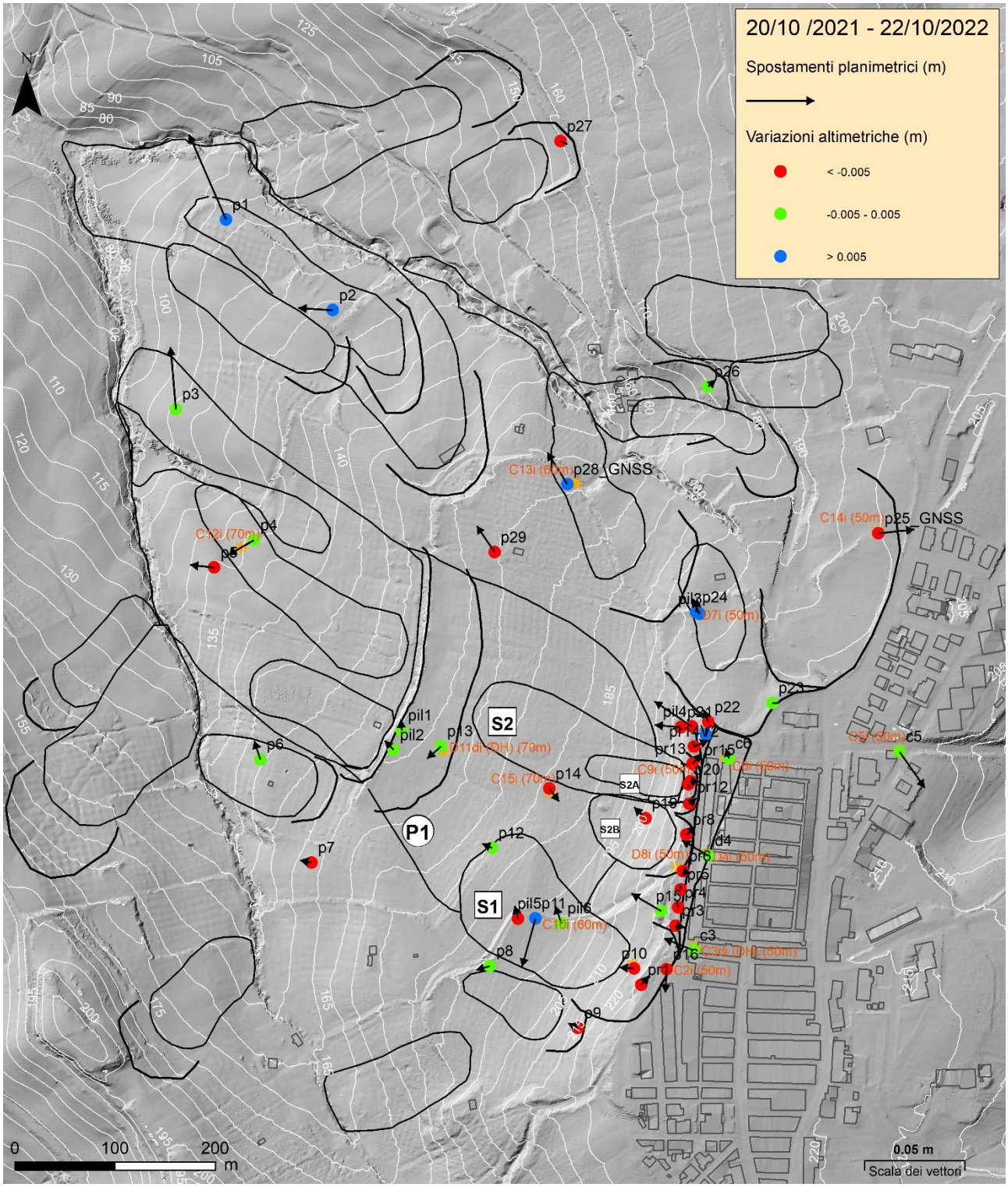


Figura 1.34 Spostamenti plano-altimetrici dei punti monitorati tra il 20/10/2021 e il 22/12/2022 riportati sul LIDAR "Apogeo 2020"

I valori a cui fa riferimento la Figura 1.34 a vengono riportati in Tabella 1.5. La posizione dei punti indicati con il suffisso GNSS è stata misurata in sessioni di 8 ore elaborate in post-processing, non essendo visibili da nessuno dei vertici di stazione. I valori di riferimento degli inclinometri sono mostrati in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**.

Tabella 1.5 Valori degli spostamenti plano-altimetrici tra il 20/10/2021 e il 22/12/2022.

ID Punto	Variazioni planimetriche (m)	Variazioni altimetriche (m)
p1	0.046	0.019
p2	0.017	0.025
p3	0.031	0.005
p4	0.015	-0.002
p5	0.012	-0.007
p6	0.010	-0.001
p7	0.006	-0.015
p8	0.007	0.002
p9	0.005	-0.005
p10	0.007	-0.015
p11	0.025	0.015
p12	0.006	0.003
p13	0.009	-0.001
p14	0.008	-0.023
p15	0.017	-0.002
p16	0.012	-0.006
p19	0.008	-0.007
p20	0.002	-0.010
p21	0.013	-0.008
p22	0.007	-0.010
p23	0.004	0.004
p24	0.007	0.016
p25_GNSS	0.018	-0.012
p26	0.005	0.000
p27	0.004	-0.005
p28_GNSS	0.019	0.011
p29	0.016	-0.005
pil1	0.005	0.001
pil2	0.006	0.002
pil3	0.008	0.016
pil4	0.023	-0.005
pil5	0.007	-0.011
pil6	0.009	0.001
pr1	0.006	-0.017
pr3	0.005	-0.014
pr4	0.003	-0.007
pr5	0.002	-0.006
pr6	0.004	-0.013
pr8	0.006	-0.015
pr10	0.005	-0.013
pr12	0.004	-0.017
pr13	0.007	-0.021
pr14	0.008	-0.108
pr15	0.004	0.008
V2	0.003	-0.009
V3	0.003	-0.015
c3bis	0.016	-0.002

c5	0.022	-0.001
c6	0.005	-0.004
d4	0.015	-0.004

Seppur caratterizzato da una minore risoluzione nel tempo rispetto alle altre metodologie impiegate, il monitoraggio con ST conferma quanto già evidenziato dalle analisi MTInSAR e dalla livellazione geometrica di precisione per l'area al ciglio del versante, dove sono state misurate, nel periodo di riferimento, variazioni altimetriche nell'ordine del centimetro.

I risultati in Figura 1.34 mostrano come i vettori plano-altimetrici desunti dalle osservazioni sostanzialmente concordino con l'assetto geomorfologico ricostruito per il versante già nella I Relazione di II Fase, infatti la gran parte dei punti in abbassamento ricadono nelle aree di alimentazione dei corpi P1, P1*, S1, S2, S2A e S2B (Figura 1.25), mentre quelli in sollevamento sono ubicati nelle zone di accumulo o di piede delle frane (vedasi in particolare, p1 e p2 in Figura 1.34), benchè tale area di accumulo appare collocarsi ancor più a nord di quanto ipotizzato dalla geomorfologia, suggerendo pertanto che il piede complessivo del processo franoso possa collocarsi in corrispondenza dell'intersezione degli affluenti meridionale e settentrionale del fosso del Fico. Inoltre, nella zona di monte i punti monitorati hanno consentito di registrare spostamenti caratterizzati da un elevata componente verticale e componente orizzontale molto ridotta; di contro invece, la componente orizzontale diventa prevalente rispetto a quella verticale in corrispondenza dei punti ricadenti nella zona di piede del versante (vedasi ad es. p1, p2, p3, p4 e p5, p6, pi11, pi12, p13 in Figura 1.34). Infine, è importante evidenziare che alcuni punti, ricadenti in prossimità delle scarpate di frana (ad es. p19, p20 e pr12 in Figura 1.34), hanno registrato spostamenti planimetrici diretti verso monte piuttosto che invece verso valle, e sono pertanto ritenuti connessi alla rotazione verso monte delle porzioni di scarpata, come atteso per porzioni di testa di uno scivolamento roto-traslativo (Figura 1.25b). Un commento è utile anche per quanto concerne i dati di spostamento che sono registrati nella zona intermedia del processo franoso; difatti, con particolare riferimento ai pilastrini pil1 e pil2 e ai punti di misura p6 e p13, tutti in Figura 1.34, si nota che essi manifestano limitati o pressochè nulli spostamenti verticali, a fronte di spostamenti planimetrici diretti verso valle rilevabili. Questi dati, con i precedenti suggeriscono che la cinematica globale del processo franoso sia caratterizzata da velocità di spostamento totale pressochè verticali, di abbassamento, nella zona di monte, con componente planimetrica molto piccola, a fronte di velocità di spostamento totale nella zona di piede con componente verticale o molto piccola, o verso l'alto (di sollevamento), ma associata a rilevante componente planimetrica diretta verso i fossi. Queste dinamiche di spostamento appaiono coerenti con un meccanismo di spostamento di più corpi, che complessivamente definiscono un processo franoso rototraslativo molto profondo (Figura 1.25). Il fatto che nella parte centrale del versante la componente verticale di spostamento sia trascurabile, con componente orizzontale più significativa, ancorché piccola (ad es. pil1, pil2, p6 e p13), suggerisce che siano possibilmente in atto fenomeni compressivi della massa in frana nella zona al centro del versante, che ivi rallentano gli spostamenti orizzontali e comportano una estensione verticale degli elementi di terreno compressi orizzontalmente, mitigando la componente verticale verso il basso dello spostamento.

1.2 Monitoraggio inclinometrico

Nel seguito viene riportato un aggiornamento dei dati di monitoraggio inclinometrico nell'ambito del versante occidentale del centro abitato di Chieuti, che integra quanto riportato nella I Relazione di II Fase (aggiornata al Gennaio 2022). Come riportato nella I Relazione di II Fase (Capitolo 10), i risultati dei rilievi inclinometrici che si discutono sono stati acquisiti in corrispondenza delle verticali inclinometriche installate sia durante la campagna geognostica eseguita da INGE s.r.l. nel 2013 (Capitolo 10, I Relazione di II Fase), che in quella recente svolta da APOGEO s.r.l.. Si ricorda che con riferimento alle verticali INGE, nel Novembre 2018 è stata svolta la verifica dell'accessibilità delle tubazioni inclinometriche e nel Maggio 2019 è stato svolto un ciclo di misure inclinometriche per le verticali ancora accessibili, come richiesto dal Commissario di Governo per l'Emergenza Idrogeologica della Regione Puglia. Successivamente, a partire da Febbraio 2021, le verticali INGE ancora accessibili (indicate in verde in Figura 1.25) sono entrate a far parte della rete di monitoraggio inclinometrico gestita da APOGEO. La Figura 1.25 riporta l'ubicazione di tutte le verticali inclinometriche monitorate. La profondità delle tubazioni inclinometriche monitorate (per le tubazioni INGE 13S1ci, 13S2ci e 13S7ci, il piegamento della tubazione ha permesso il monitoraggio solo nella porzione al di sopra del piegamento) sono riportate in Tabella 1.6.

Tabella 1.6: Tempistiche del monitoraggio inclinometrico in relazione agli inclinometri di recente installazione ad opera di APOGEO, ma anche in relazione a quelli installati nell'ambito della campagna INGE del 2013.

numero	SONDAGGIO	INCLINOMETRI	Misura L0 feb/21 (*) fatte altro periodo		Misura L1 giu-lug-ago/2021		Misura L2 16-19/ott/2021		Misura L3 22-25/feb/2022		Misura L4 20-25/lug/2022		**Misura L5 28-29/nov/2022 02-03/dic/2022**	
		Prof. (m)	ora	data	ora	data	ora	data	ora	data	ora	data	**ora**	**data**
1	**C2i**	50	9:57	26/02/21	15:44	30/07/21	8:44	16/10/21	11:57	22/02/22	8:46	20/07/22	**13:40**	**29/11/22**
2	**C3di - bis**	46	10:26	27/04/21	11:23	30/07/21	14:38	16/10/21	9:03	25/02/22	10:34	20/07/22	**15:00**	**29/11/22**
3	**D4i**	50	16:01	25/02/21	12:37	21/07/21	12:13	16/10/21	13:59	22/02/22	19:09	23/07/22	**16:30**	**29/11/22**
4	**C5i**	50	9:37	25/02/21	15:41	17/06/21	12:26	17/10/21	14:16	25/02/22	17:47	23/07/22	**7:55**	**29/11/22**
5	**C6i**	50	13:11	25/02/21	9:50	21/07/21	10:32	16/10/21	17:30	22/02/22	12:39	24/07/22	**15:00**	**28/11/22**
6	**D7i**	50	16:44	22/02/21	0:00	31/07/21	13:11	18/10/21	13:39	23/02/22	10:25	25/07/22	**10:14**	**02/12/22**
7	**D8i**	50	13:41	24/02/21	7:53	18/06/21	15:46	19/10/21	12:54	25/02/22	12:56	20/07/22	**12:30**	**02/12/22**
8	**C9i**	50	15:51	24/02/21	8:58	01/08/21	16:14	18/10/21	16:40	24/02/22	14:51	20/07/22	**14:00**	**02/12/22**
9	**C10i**	60	15:14	23/02/21	15:13	16/06/21	12:10	19/10/21	13:11	24/02/22	7:45	23/07/22	**8:40**	**03/12/22**
10	**D11di**	70	10:05	23/02/21	7:18	31/07/21	8:38	19/10/21	9:34	24/02/22	10:27	23/07/22	**12:30**	**03/12/22**
11	**C12i**	70	11:32	22/02/21	8:56	16/06/21	7:49	18/10/21	9:27	23/02/22	6:39	25/07/22	**11:30**	**29/11/22**
12	**C13i**	60	14:24	22/02/21	9:33	16/06/21	10:46	18/10/21	11:35	23/02/22	8:31	25/07/22	**9:30**	**29/11/22**
13	**C14i**	50	11:09	25/02/21	6:46	01/08/21	8:57	17/10/21	11:15	24/02/22	14:18	24/07/22	**8:36**	**02/12/22**
14	**C15i**	70	12:15	23/02/21	9:48	31/07/21	10:23	19/10/21	11:13	24/02/22	12:13	23/07/22	**10:48**	**03/12/22**
15	**D16i**	50	10:46	24/02/21	6:49	30/07/21	15:16	17/10/21	16:07	23/02/22	17:45	24/07/22	**16:08**	**02/12/22**
16	**13S1_ci**	25	17:08	24/02/21	10:30	01/08/21	15:12	18/10/21	17:45	24/02/22	BLOCCATO	NON FATTO	**BLOCCATO**	**NON FATTO**
17	**13S2_ci**	15	16:54	23/02/21	16:02	31/07/21	12:53	19/10/21	14:13	24/02/22	9:15	23/07/22	**10:00**	**03/12/22**
18	**13S3_ci**	48	11:33	26/02/21	12:10	18/06/21	10:35	17/10/21	9:50	22/02/22	11:23	24/07/22	**14:40**	**03/12/22**
19	**13S6_ci**	35	16:00	03/02/21	18:53	30/07/21	16:49	16/10/21	16:00	22/02/22	9:59	24/07/22	**15:50**	**03/12/22**
20	**13S7_ci**	15	12:21	24/02/21	9:55	30/07/21	15:58	17/10/21	17:07	23/02/22	19:02	24/07/22	**17:30**	**02/12/22**

Nell'analisi fenomenologica del processo franoso oggi attivo sono stati integrati anche i dati inclinometrici pregressi, acquisiti tra il 1986 ed il 2019; nella II Fase della Convenzione qui di riferimento sono state svolte misure da Febbraio 2021 (misura di zero) fino a Dicembre 2022. Le tempistiche delle letture sono riportate nella Tabella 1.6. Si ricorda che le letture inclinometriche delle campagne passate, ossia quelle del 1986 e del

2013, sono state già estensivamente discusse nella I Relazione di II Fase. Pertanto, nella presente relazione tali dati verranno inclusi nell'analisi complessiva, ma non discussi in dettaglio. Viceversa, nel seguito sono discussi in dettaglio i risultati dei monitoraggi inclinometrici effettuati da APOGEO s.r.l. dal Febbraio 2021 fino a Dicembre 2022.

Nella Figura 1.35 sono mostrati i vettori di spostamento orizzontale monitorato per i diversi inclinometri, o quando lungo bande di taglio (e/o zone di localizzazione della deformazione) intercettate dagli inclinometri che sono riportate con frecce rosse (in Figura 1.35), oppure quando lungo zone di deformazione non localizzata riportate tramite frecce blu tratteggiate (in Figura 1.35), come discusso e commentato in dettaglio nel seguito in relazione ad ogni verticale inclinometrica. I vettori di spostamento orizzontale seguono la legenda presente in Figura 1.35.

Nelle Figura 1.36 a Figura 1.55 difatti, si riporta l'andamento, per ciascuna verticale inclinometrica, degli spostamenti orizzontali cumulati con la profondità (terzo grafico da sinistra) e la proiezione su un piano orizzontale della deformata del tubo inclinometrico (grafico polare sulla destra), con l'indicazione della direzione del Nord geografico. Le direzioni azimutali discusse nel testo sono state misurate, a partire dalla direzione Nord, in senso antiorario e sono state utilizzate per la redazione dei vettori di spostamento mostrati in Figura 1.35.



Figura 1.35 LIDAR "Apogeo 2020" con i vettori di spostamento orizzontale monitorati lungo le tubazioni inclinometriche

1.2.1 Misure lungo le tubazioni inclinometriche installate da Apogeo nel 2020

L'inclinometro C2i è ubicato nel piazzale a sud, sul lato settentrionale delle case INA, in prossimità della scarpata SR (Figura 1.25) e a monte della porzione dell'opera di sostegno sede del tiltmetro CE07. Dunque, il C2i è situato in un'area sede di significativi spostamenti, documentati nelle Figura 1.1Figura 1.2Figura 1.3 (area A sede delle massime velocità di spostamento), Figura 1.4Figura 1.9Figura 1.10Figura 1.13Figura 1.15,

ed a monte di una porzione di muro su pali attualmente in rotazione, come indicato dal tiltmetro CE07 (Figura 1.28 e Figura 1.29). Come discusso nella I Relazione di II Fase, infatti, tale inclinometro è stato installato al fine di diagnosticare i fenomeni di retrogressione del processo franoso nel settore meridionale dell'area urbana. La lettura di zero per questa verticale inclinometrica è stata effettuata in data 22/02/2021; le successive letture fanno riferimento a tale lettura di zero. Il grafico con la profondità degli spostamenti cumulati orizzontali (Figura 1.36) indica che sono attivi degli spostamenti verso Ovest sin quasi dal piede della tubazione inclinometrica (50 m). Un debole aumento localizzato del gradiente di spostamento con la profondità è osservato a circa 23 metri da p.c. (22.5-23.0 m, direzione O-NO), possibilmente compatibile con una banda di taglio secondaria (interna al corpo con banda di taglio più profonda) e coerente con la banda di taglio riconosciuta tramite i rilievi lungo l'inclinometro 13S7 nel passato (piegamento a 25 m di profondità). È necessario però chiarire che la localizzazione a 23 m di profondità appare non essere in evoluzione. L'andamento in pianta della direzione del vettore spostamento lungo tale verticale è mostrato in



Figura 1.35.

Considerando i valori di spostamento orizzontale misurati fino ad oggi alla testa del tubo inclinometrico, la velocità media di spostamento al p.c. appare essere di poco meno di 3 mm/anno e diretta verso Ovest, quindi concorde con la direzione di massima pendenza del versante. Allo stato attuale, però, gli spostamenti inclinometrici sono ancora troppo piccoli per poter apprezzare nette bande di taglio in profondità. Pertanto, si attendono i dati dei successivi rilievi inclinometrici per poter definire in maniera esaustiva la collocazione e morfologia della banda di taglio nella zona qui di riferimento.

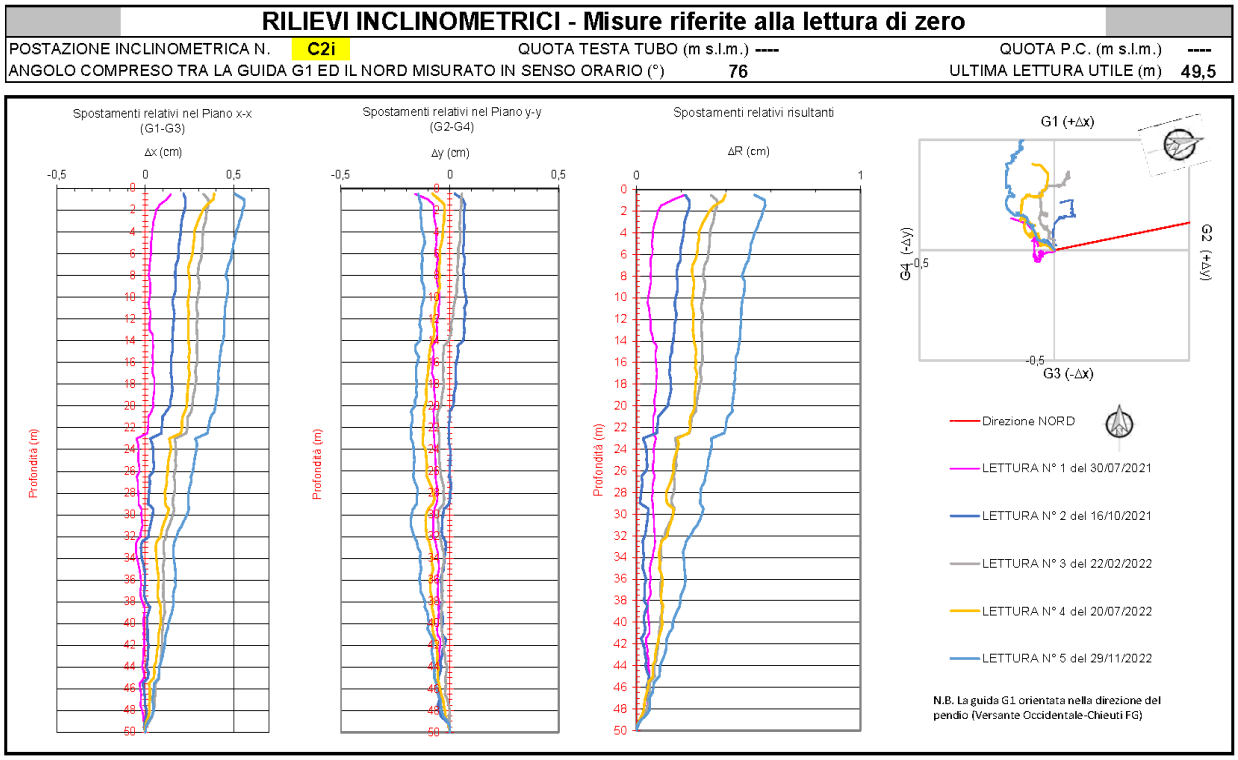


Figura 1.36 Inclinometro C2i: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 26/02/2021

L'attività in forte evoluzione di questa porzione di versante è stata d'altronde messa in evidenza dai risultati del monitoraggio tramite tiltmetri installati sul muro in questa porzione meridionale (CE07 e CE08 §1.1.3), che come ricordato dianzi, hanno subito una rotazione di recente.

L'inclinometro D16i ricade in prossimità della verticale inclinometrica 13S7ci (Figura 1.25), per cui la misura effettuata nel 2019 riscontrò un piegamento a 25 m dal p.c. I dati inclinometrici ottenuti per il D16i sono mostrati in Figura 1.37 e sono indicativi di spostamenti orizzontali cumulati coerenti con due zone di localizzazione della deformazione, a 45 e 31 metri da p.c., connesse a spostamenti verso Ovest e Nord-Ovest (



Figura 1.35). Lo spostamento devia verso Est da 28 m di profondità sino a piano campagna, probabilmente come effetto del locale sovrapporsi di più bande di taglio retrogressive, confinanti corpi innestati l'un dentro l'altro, come tipico per la complessa dinamica di retrogressione della rottura nelle zone di scarpata.

In questo caso il rilievo inclinometrico ha escluso l'ultimo mezzo metro di tubazione profondo, a partire dalla terza lettura (Febbraio 2022).

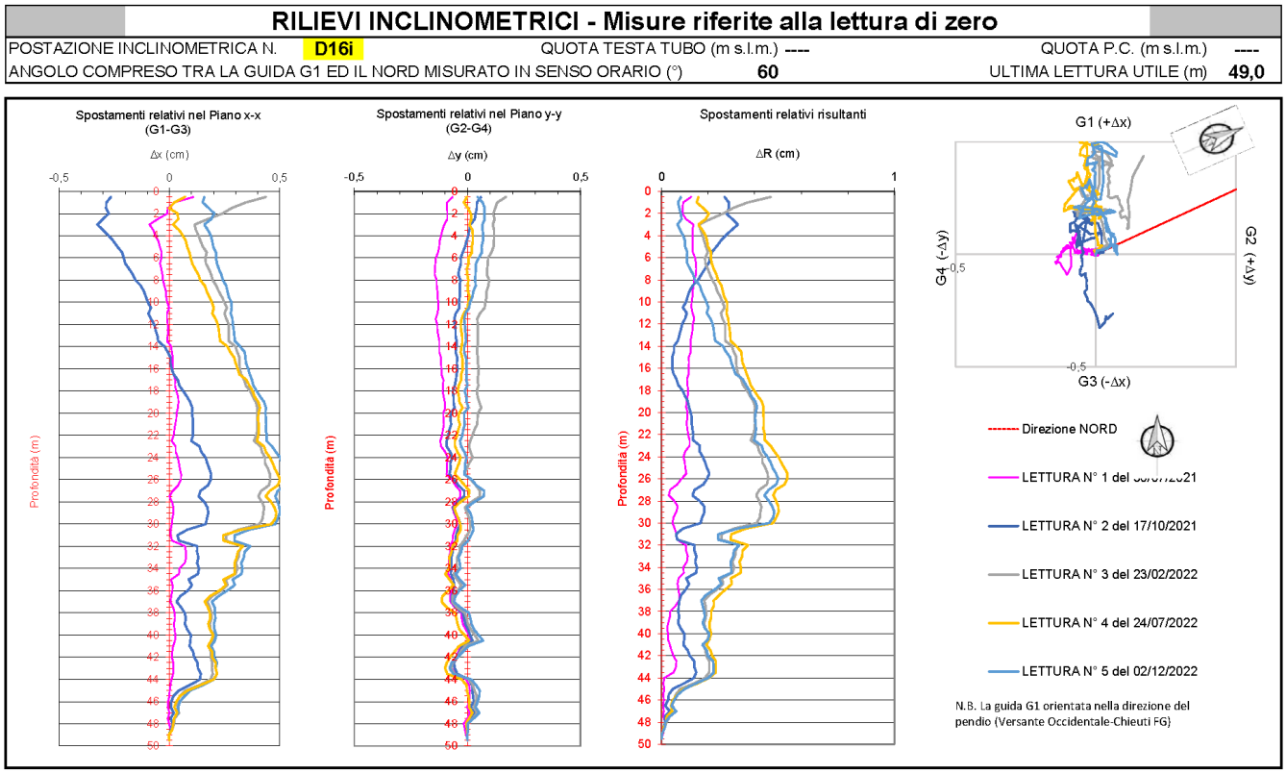


Figura 1.37: Inclinometro D16i: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 24/02/2021.

L'inclinometro C10i è ubicato all'interno del corpo secondario S1, in prossimità della verticale inclinometrica 13S2, lungo cui si è registrato un piegamento della tubazione a circa 15 m dal p.c. (rilievi 2018-2019, §10.2 della I Relazione di II Fase).

I dati inclinometrici acquisiti per il C10i sono riportati nei grafici di Figura 1.38. L'ultima deformata inclinometrica, relativa a Dicembre 2022, conferma il piegamento alla profondità di circa 54-56 m dal p.c. identificato in precedenza, con spostamenti verso Nord Ovest lungo la banda di taglio in profondità (



Figura 1.35). A profondità inferiori a 44 m da p.c. i dati indicano una rotazione del vettore spostamento verso Est.

Continua ad essere quindi plausibile che questo inclinometro sia attraversato, tra 54 e 56 m dal p.c., dalla banda di taglio emergente lungo la scarpata SR (Figura 1.25), che soggiace al corpo P1*, tale da causare lo spostamento del tubo verso NO. La deviazione verso est della deformata inclinometrica a minori profondità potrebbe comunque essere effetto dell'attività, per scivolamento rototraslativo, di un corpo secondario meno profondo, quale è il corpo S1, intercettato in passato dall'inclinometro 13S2. Inoltre, si segnala che nella parte

del pendio a monte dell'inclinometro C10i, i tiltmetri CE07 e CE08 discussi nel §1.1.3 hanno mostrato durante l'ultimo mese delle rotazioni del muro non trascurabili, compatibili con lo spostamento delle masse a valle del muro, rilevato dalle letture appena discusse.

Vale poi la pena evidenziare che la banda di taglio profonda rilevata dall'inclinometro C10i è corroborata dal riscontro di un livello di argille con resistenza al taglio relativamente bassa a circa 51 m di profondità lungo il sondaggio C10i (campione C10i-C; §7 della I Relazione di II Fase).

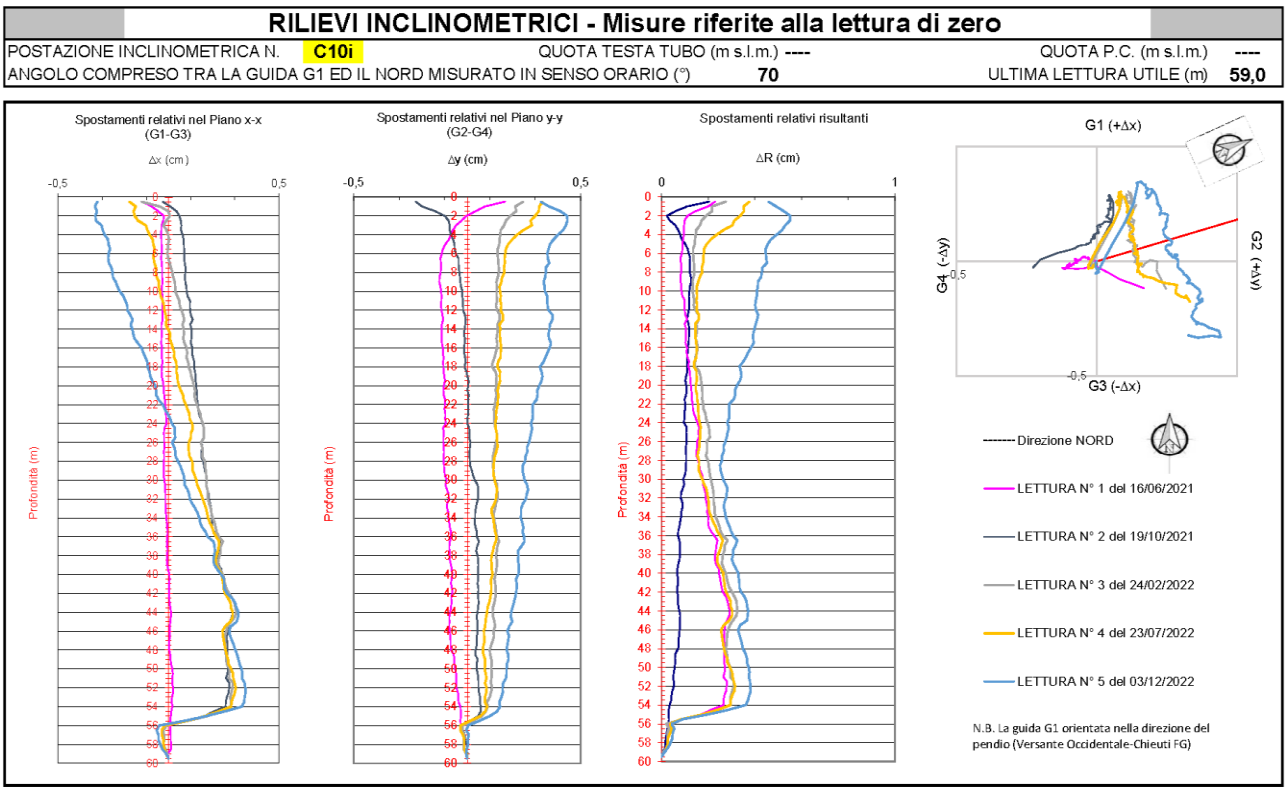


Figura 1.38: Inclinometro C10i: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 23/02/2021.

Tutti gli inclinometri da valle a monte nella zona sud (D16i, C10i e C2i) nel complesso evidenziano l'attività di masse di terreno sino a significativa profondità, di 50 m lungo il C10i e più ridotta nel C2i, che è più vicino alla scarpata SR del processo franoso (Figura 1.25 e



Figura 1.35). Questa attività può essere la fonte del processo che ha determinato di recente la rotazione dei tiltmetri installati sul muro collocato in questa porzione del versante, ossia il CE07 ed il CE08 (§1.1.3 Figura 1.28Figura 1.29Figura 1.30Figura 1.31).

Dunque, i dati del monitoraggio inclinometrico lungo le verticali, da est verso ovest, C2i, D16i e C10i, e del monitoraggio dei tiltmetri CE07 e CE08 appaiono complessivamente delineare in maniera sufficientemente chiara l'attività franosa, con direzione ovest- nord ovest, nel settore meridionale della parte alta del versante in studio. Tale attività franosa è la causa degli spostamenti monitorati in superficie sia nella porzione

urbanizzata del versante (§1.1.2 e §1.1.3), sia nella zona di valle non urbanizzata (§1.1.5), tramite le diverse tecniche di monitoraggio geomatico discusse nel §1.1.1. Coerentemente con l'interpretazione geomorfologica già avanzata nella I Relazione di II Fase, si ritiene che questa attività franosa nella sezione meridionale della parte alta del versante sia connessa all'attività del piede comune ai corpi di frana P2 e P1 in Figura 1.25 (parte bassa del versante), documentata dai risultati del monitoraggio inclinometrico lungo la verticale C12i, qui di seguito discussi.

La verticale inclinometrica C12i, profonda 70 m, è posizionata nella parte bassa del corpo P1, centrale per il corpo P2, che secondo la ricostruzione geomorfologica in Figura 1.25 condividono la banda di taglio al piede e paiono essere parte di meccanismo rototraslativo multiplo. Come si evince dalla Figura 1.39, gli spostamenti cumulati orizzontali sono indicativi della presenza di una banda di taglio tra 50.5 e 48.5 m da p.c. (piede del tubo inclinometrico stabile), lungo cui lo spostamento è stato di quasi 5 mm dalla lettura di zero ad oggi. Lo spostamento orizzontale cumulato a circa 2.5 m da p.c. raggiunge circa 6 mm (ultima lettura di Dicembre 2022). Le ultime tre letture inclinometriche paiono inoltre dare indicazione di piccolissimi spostamenti verso nord nella porzione di terreno al di sotto della banda di taglio a 50 m. Si segnala che anche per questo inclinometro gli spostamenti nell'ultimo metro di tubazione inclinometrica, in profondità, non sono stati rilevati a partire dalla terza lettura (Febbraio 2022).

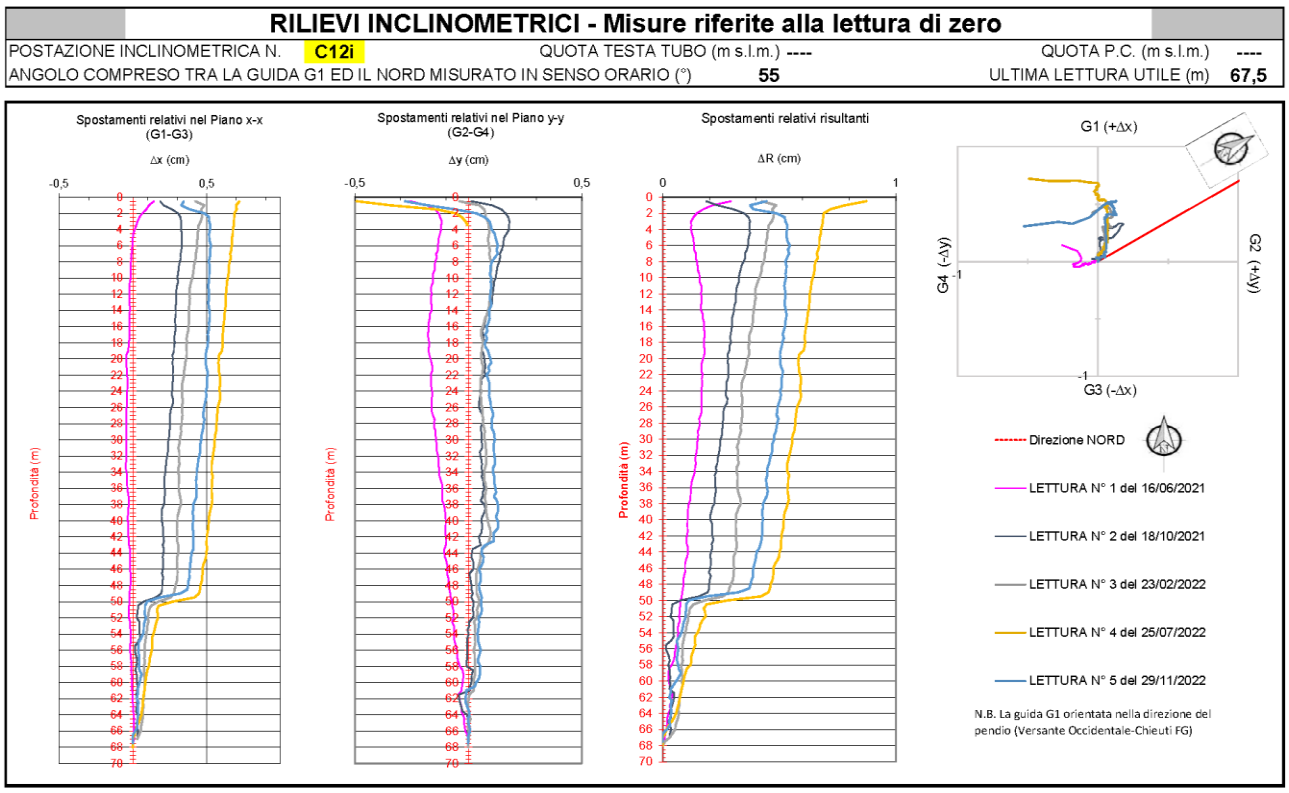


Figura 1.39: Inclinometro C12i: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 22/02/2021.

L'inclinometro C3di è ubicato ancora nella piazza sede del C2i, a nord-est rispetto a questo e subito a monte della scarpata SR2 (Figura 1.25). I dati misurati nel tempo con la profondità sono mostrati nella Figura 1.40, dalla quale si evince che la deformata inclinometrica (per tutte le letture) configura uno spostamento orizzontale cumulato trascurabile (meno di 2 mm). Inoltre, per tutte le letture la direzione in pianta degli spostamenti profondi è diretta verso Est (Figura 1.40). Dunque, le letture lungo tale inclinometro sinora non forniscono evidenze di retrogressione della fenomenologia franosa ad ovest della scarpata SR2, per quanto desumibile da rilievi entro 46 m di profondità.

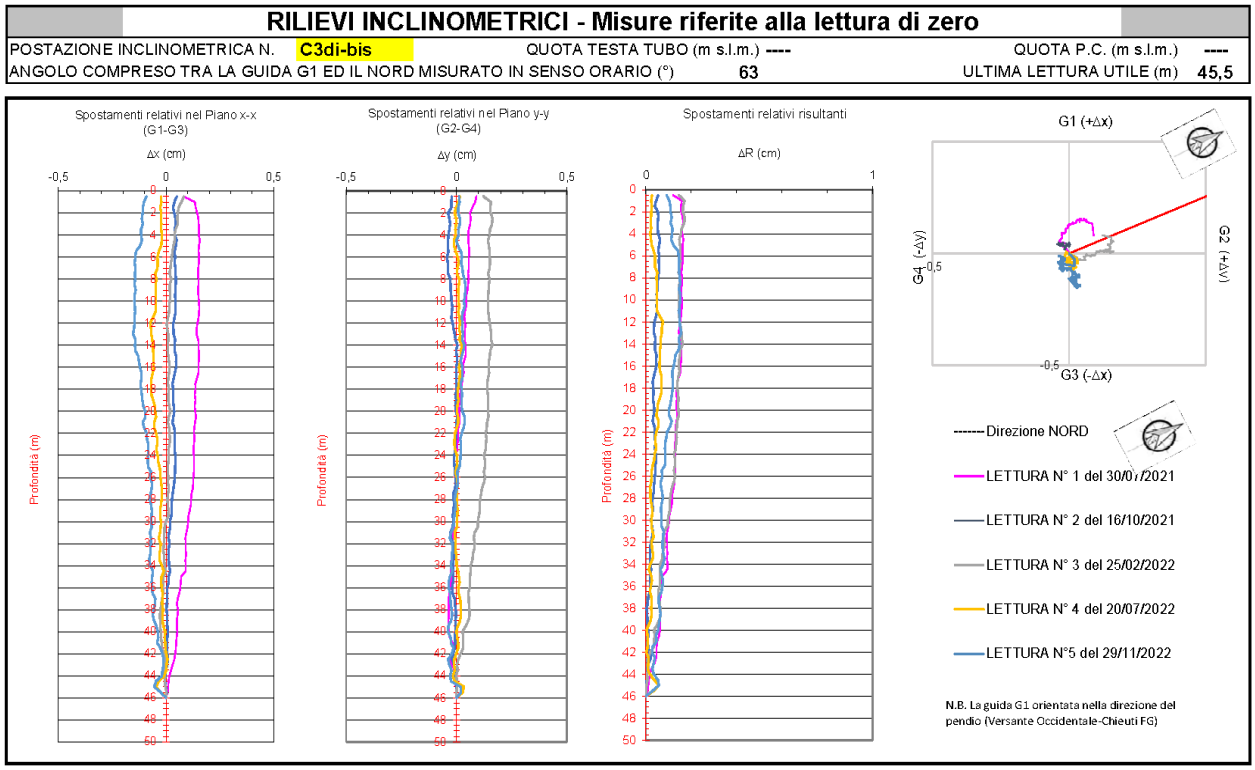


Figura 1.40: Inclinometro C3di: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 25/02/2021.

I dati inclinometrici rilevati lungo la verticale D4i, posizionata più a nord ed il cui boccaforo è molto prossimo all'affioramento della scarpata SR2 (Figura 1.25; foto F10 in Figura 2.6.4 nella I Relazione di II Fase), sono riportati in Figura 1.41, dalla quale si evince che il tubo inclinometrico appare stabile a profondità maggiore di 46 m. A profondità inferiori si registrano piccolissimi spostamenti, tendenzialmente verso ovest, per quanto la deformata inclinometrica indichi un recente doppio piegamento intorno ad un punto ubicato a circa 40 m di profondità da p.c. Quindi i dati appaiono indicare un'attività della scarpata, per quanto non mettano ancora in evidenza alcuna localizzazione della deformazione indicativa di un'attuale retrogressione della banda di taglio in profondità. Si segnala che l'ultimo mezzo metro di tubazione inclinometrica, in profondità, non è stato più soggetto a monitoraggio a partire dalla quinta lettura (Novembre 2022).

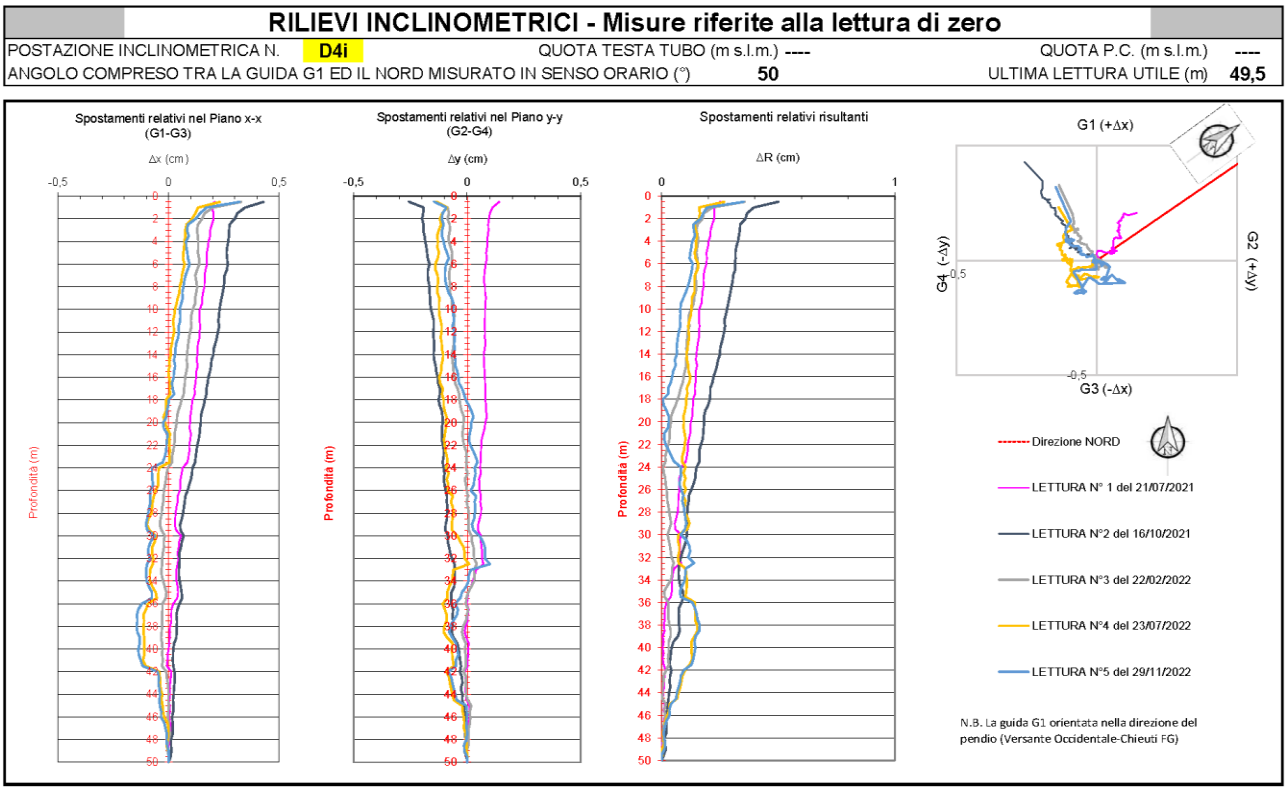


Figura 1.41: Inclinometro D4i: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 25/02/2021.

La verticale inclinometrica C6i è ubicata tra le scarpate SR1 e SR2 (Figura 1.25), ove sono stati registrati importanti dissesti delle infrastrutture e delle strutture (Capitolo 2 I Relazione di II Fase) e significativi spostamenti plano-altimetrici (§1). Come si evince dalla Figura 1.42, lo spostamento cumulato orizzontale del tubo inclinometrico al piano campagna raggiunge i 4 mm (Novembre 2022) verso Sud Est, ossia in direzione opposta alla massima pendenza del versante occidentale in cui l'inclinometro è collocato. La deformata inclinometrica, inoltre, non mostra evidenti localizzazioni della deformazione, così come non si ravvisano evoluzioni dello spostamento nel tempo (le ultime quattro letture sono sovrapposte). Si può dunque ritenere che la rotazione del tubo inclinometrico verso Sud Est sia compatibile solo con una dinamica di rotazione verso monte di una profonda massa di terreno in cui il tubo inclinometrico risulta installato, e che si insedia tra le due scarpate SR1 e SR2 del processo franoso. Si ritiene, infatti, che lo scivolamento lento di tale massa verso valle sia accompagnato da una sua rotazione verso monte. Infatti, nell'ipotesi che l'inclinometro C6i risulti pressoché interamente incluso in tale massa (piede mobile a 48 m), anche la tubazione inclinometrica C6i subirebbe una rotazione verso monte, come registrato con le misure. Anche per questa verticale occorre però attendere i prossimi rilievi inclinometrici per poter avvalorare tale interpretazione.

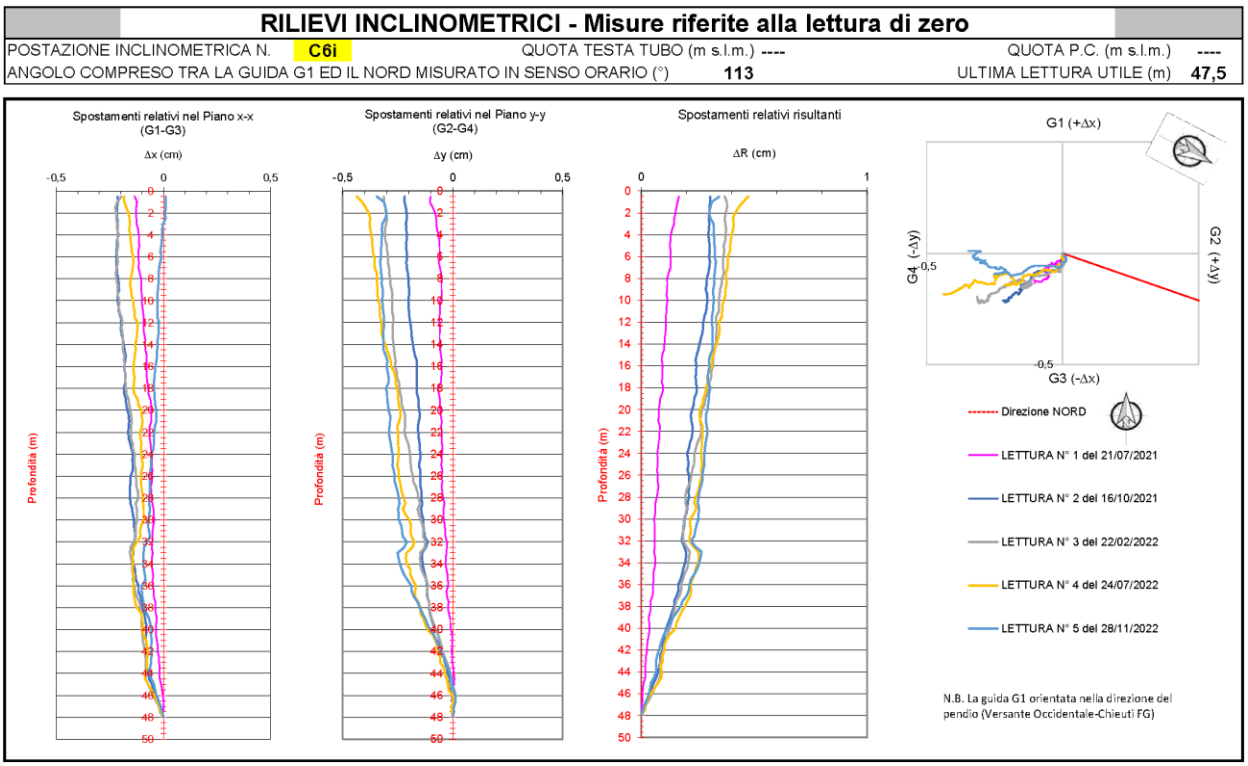


Figura 1.42: Inclinometro C6i: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 25/02/2021.

La verticale inclinometrica D8i è posizionata subito a valle dell'opera di contenimento del 2004-2005 e della scarpata SR1, e poco a monte della testa del corpo S2B, incluso nell'area di alimentazione dei corpi profondi P1 e P1* (Figura 1.25). I dati inclinometrici lungo questa verticale sono mostrati nella Figura 1.43, dalla quale si evince come la deformata inclinometrica non mostri né la presenza di definite bande di taglio, né l'attività di una rotazione del tubo verso valle. Le letture successive alla seconda hanno infatti smentito quanto inizialmente rilevato sulla base dell'analisi della lettura di Ottobre 2021, dalla quale pareva evincersi uno spostamento cumulato orizzontale verso sud. Quindi, fino ad oggi gli spostamenti desumibili dal rilievo lungo l'inclinometro D8i risultano essere di tale modesta entità da far supporre che l'intero inclinometro sia interno alla massa franosa attiva in scarpata, con piede dell'inclinometro, a 48 m di profondità, installato in una in zona in movimento.

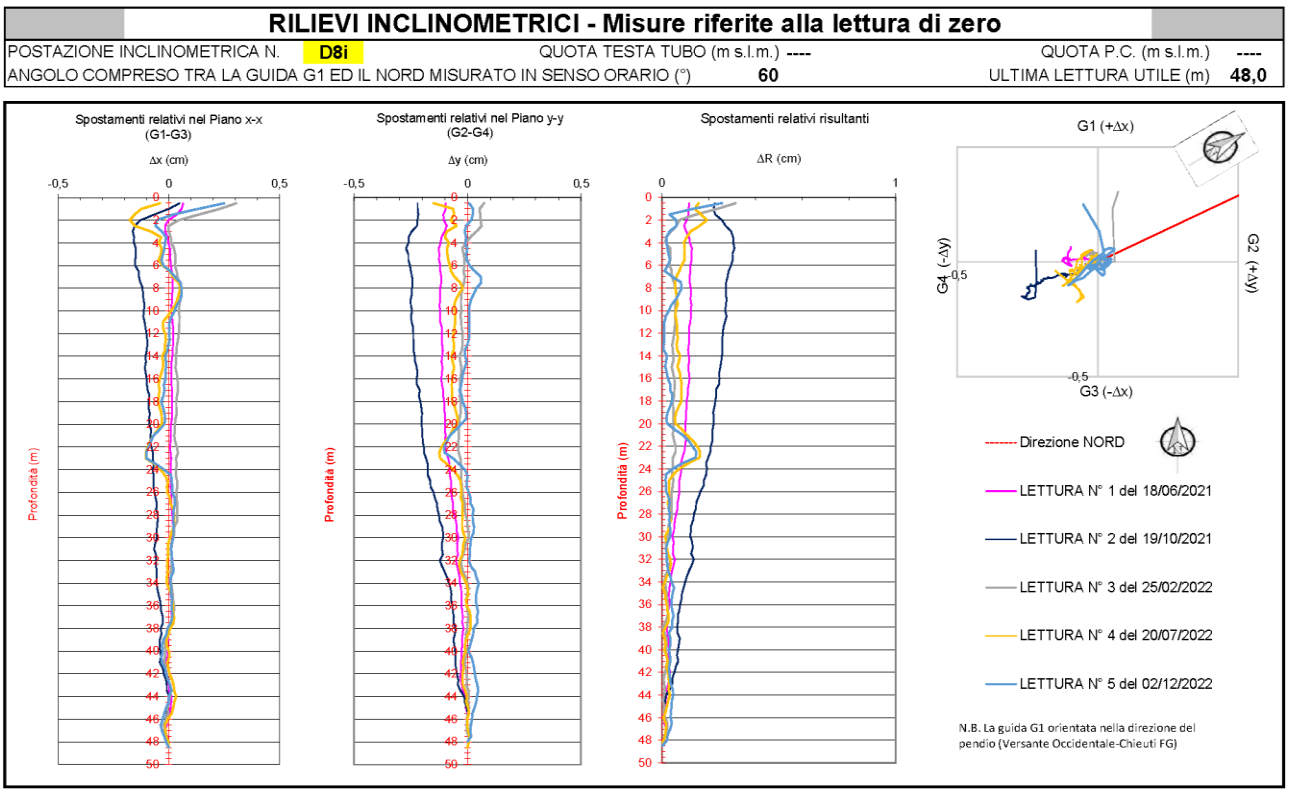


Figura 1.43: Inclinometro D8i: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 24/02/2021.

L'inclinometro C9i, profondo 48 m, ricade anch'esso a valle del muro ed internamente alla scarpata SR1, ma inoltre esso ricade nelle scarpate dei corpi secondari S2 e S2A ed in prossimità della verticale inclinometrica 13S1ci, che nel 2019 risultava sede di un piegamento a 25 m dal p.c., possibilmente dovuto alla banda di taglio emergente in superficie lungo la scarpata SR1, in una porzione in cui questa è anche scarpata di S2 e S2A (Figura 1.25 e §0). Le prime letture inclinometriche del C9i non fanno riconoscere la presenza di una banda di taglio (Figura 1.44). Viceversa, le ultime tre letture danno evidenza ad una localizzazione della deformazione alla profondità di 23-24 m da p.c., (coerente con il piegamento rilevato nel 13S1ci), con direzione di spostamento verso Nord-Ovest (Figura 1.44 e



Figura 1.35). A maggiori profondità gli spostamenti hanno un gradiente continuo compatibile con una rotazione dell'inclinometro intorno al piede e con un piede dell'inclinometro a 48 m interno ad un corpo più profondo attivo, plausibilmente delimitato dalla banda di taglio retrogressiva che emerge lungo la scarpata SR2. La localizzazione della deformazione a 24 m da p.c. lungo il C9i sarebbe quindi connessa all'attività della banda di taglio del processo franoso S2, che plausibilmente si raccorda con la scarpata SR1 del corpo profondo. Si auspica comunque una verifica di questa tendenza evolutiva tramite ulteriori dati di monitoraggio. L'attività della retrogressione nell'area del C9i è coerente con le rotazioni misurate dai tiltmetri, collocati in

questa porzione del ciglio, maggiori rispetto a quelle misurate dai tiltmetri collocati sia più a nord, sia più a sud. CE03 e CE04, discussi nel §1.1.3, hanno subito durante l'ultimo mese delle rotazioni non trascurabili, probabilmente connesse alla maggiore attività degli spostamenti nel tratto del ciglio che vede al centro il sondaggio C9i.

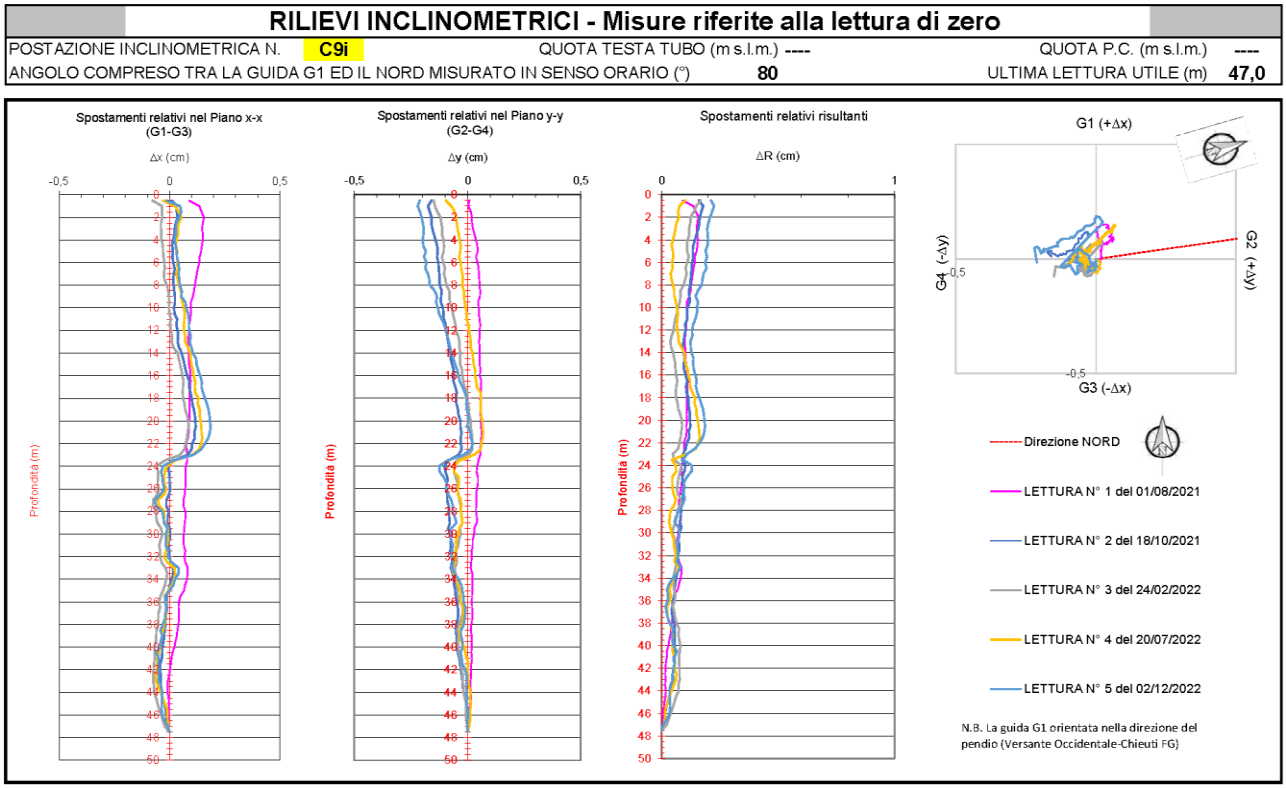


Figura 1.44: Inclinometro C9i: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 24/02/2021.

La verticale inclinometrica C15i è posizionata nella parte alta del corpo P1, lungo la sezione di massima pendenza del pendio, ed ha una profondità di 70 m. La deformata inclinometrica nell'ultima lettura in Figura 1.45 mostra spostamenti cumulati trascurabili, dell'ordine di circa 2 mm in direzione sud, ma si ritiene che tale inclinometro non stia fornendo indicazioni rilevanti e si paventa che il suo piede non sia stabile, bensì sia interno al corpo franoso profondo (Figura 1.45). Risulta comunque necessario attendere tempi più lunghi di monitoraggio per una valutazione appropriata degli effetti del processo franoso su questa tubazione inclinometrica. Si segnala, inoltre, che anche per questo inclinometro l'ultimo metro e mezzo in profondità della tubazione inclinometrica non è stato sede di misura a partire dall'ultima lettura (Dicembre 2022).

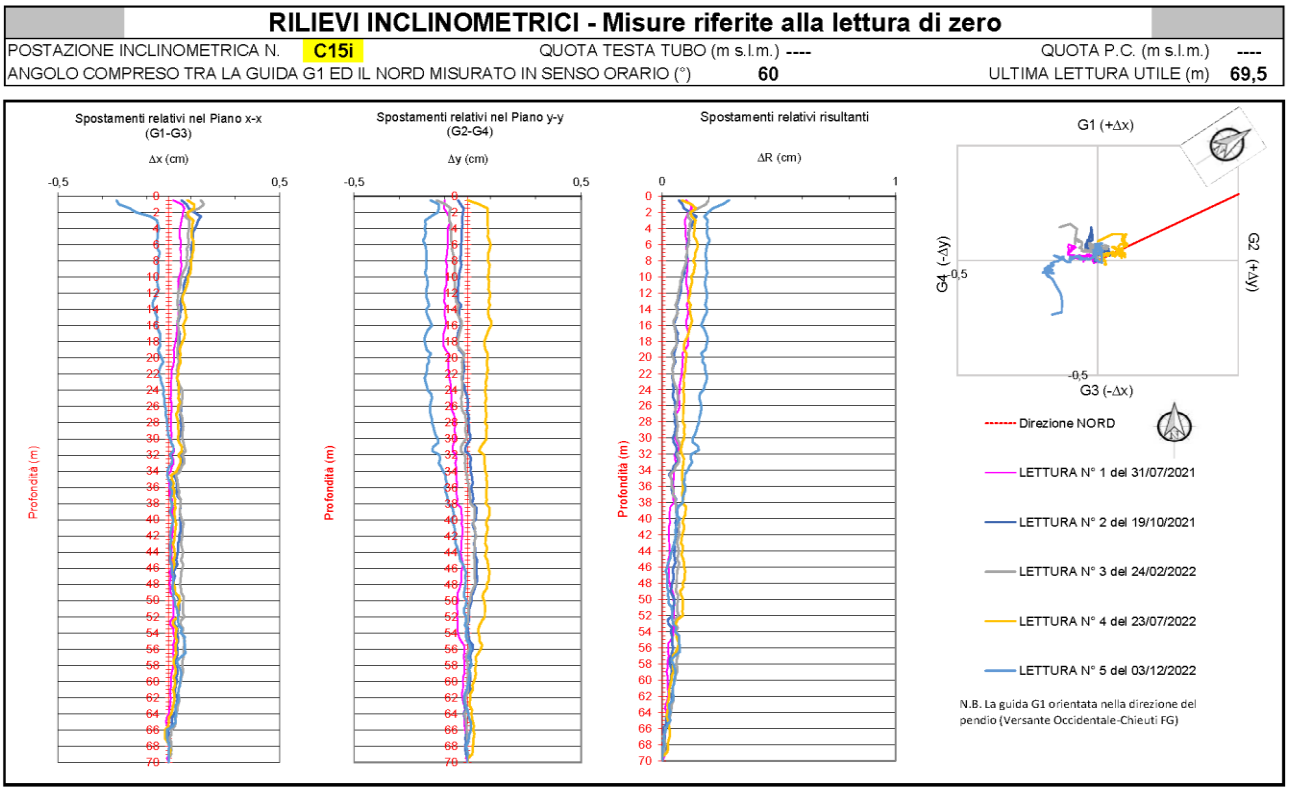


Figura 1.45: Inclinometro C15i: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 23/02/2021.

La verticale inclinometrica D11i è ubicata poco a monte della nicchia di distacco del corpo di frana P2, SR0, ed immediatamente a valle della scarpata interna SRi (Figura 1.25). I dati acquisiti fino ad oggi per questo inclinometro sono mostrati nella Figura 1.46, dalla quale si evince che da circa 67 m sino a circa 44 m di profondità il rivestimento inclinometrico ha subito una debole rotazione essenzialmente verso nord, per poi deviare verso nord-est sino a 34 m di profondità e rientrare verso sud da questa profondità al piano campagna, il tutto entro uno spostamento massimo di 6 mm (



Figura 1.35). È possibile che dinamiche deformative della scarpata interna SRi incidano su questa deformata

inclinometrica, che però non appare intercettare la banda di taglio profonda del corpo P1-P1* (Figura 1.25) entro la profondità del piede, a 70 m.

Si ritiene, pertanto, di dover attendere i risultati dei successivi rilievi per poter interpretare esaustivamente l'andamento degli spostamenti profondi in questa zona del pendio. Si segnala che non sono stati monitorati spostamenti nell'ultimo metro di tubazione inclinometrica a partire dalla seconda lettura (Ottobre 2021).

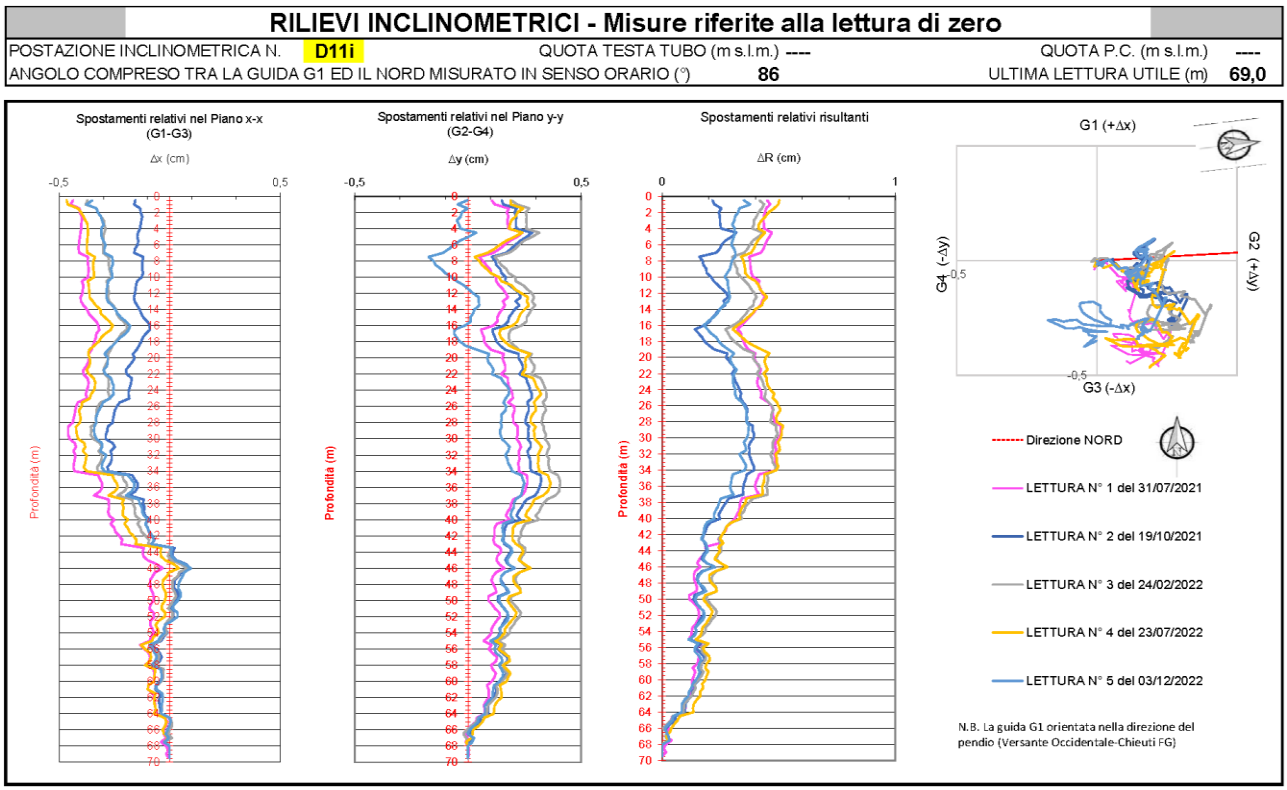


Figura 1.46: Inclinometro D11i: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 23/02/2021.

Alla luce dell'analisi combinata dei dati inclinometrici, dei dati geomorfologici discussi nella I Relazione di II Fase (Figura 1.25) e dei dati geomatici discussi in precedenza (§1.1), si evince che il processo franoso è oggi attivo dalla scarpata principale SR2 sino al piede del versante presso il Fosso del Fico, e coinvolge masse sino a grande profondità (profondità massima anche superiore a 70 m). Infatti, i dati geomorfologici discussi nella I Relazione di II Fase già supportavano l'attività di un processo franoso che dal piede del corpo P2, comune al P1, coinvolge le masse che formano i corpi P2, P1 e P1* in Figura 1.25, quest'ultimo inclusivo anche delle masse franose collocate tra le scarpate SR1 e SR2. Nel complesso, infatti, le masse franose possono oggi essere considerate parte di un unico corpo P1*, purché lo si consideri sede di porzioni altamente deformate e di più scarpate interne e bande di taglio ivi emergenti, che si raccordano con una banda di taglio molto profonda. Parimenti, le masse di terreno coinvolte oggi nel processo franoso attivo possono essere considerate parte di più corpi franosi tra essi interagenti, dal piede verso monte: corpo P2, corpo P1 (che include il P2 nella parte bassa) e, nella parte alta del versante sede delle scarpate SR1 e SR2, corpo C (Figura 1.25). Per quest'ultimo si ipotizza che il piede soggiaccia alla testa del corpo P1, o che comunque con questo interagisca, per cui la sua stabilità dipende non solo dalle resistenze disponibili nella banda di taglio che lo confina in profondità, ma anche dall'attività del corpo P1 (a sua volta condizionato dall'attività del corpo P2), il cui movimento verso

valle ne comporta uno scarico laterale, e quindi una perdita di sostegno passivo a valle. Tale corpo C ha una configurazione tipo cuneo in scarpata e, secondo i dati geomatici (§1.1), è sede di spostamenti a componente verticale dominante (rapporto tra la componente verticale dello spostamento e orizzontale circa 4). Ciò è possibile solo se tale corpo si muove per distorsioni in una banda di taglio, che lo confina in profondità e che si immerge dalla scarpata SR2 sub-verticalmente, conferendo a tale corpo una notevole profondità. I dati geomatici (§1.1), al contempo, indicano che gli spostamenti dei corpi nella parte di valle del versante hanno maggiore componente orizzontale (Figura 1.11).

La verticale inclinometrica C13i, profonda 60 m, è posizionata a nord the corpo P1, con lo scopo di monitorare quanto la dinamica franosa sia attiva anche nella parte settentrionale del bacino franoso. Il grafico dello spostamento cumulato orizzontale (Figura 1.47) non mostra zone in cui la deformazione si localizza ed è indicativo di una rotazione della tubazione inclinometrica verso nord, da circa 52 m di profondità sino a piano campagna, ove lo spostamento diventa di circa 4 mm (si riconosce anche una deviazione verso ovest nei primi 4 m di profondità). Dunque, le misure inclinometriche lungo tale verticale suggeriscono un lentissimo movimento del terreno verso il fosso a Nord (collocato nella zona nord del versante), le cui sponde sono in evoluzione erosiva, come d'altronde osservato anche per le sponde del fosso a Sud al piede dei corpi P1 e P2.

La verticale inclinometrica D7i, profonda 50 m, è posizionata nel settore Nord del paese, a monte della sorgente Crojo ed al di fuori del corpo più grande P1. Tale inclinometro si colloca difatti in una porzione di versante verosimilmente sede di uno svuotamento per frana ancor più antico del processo franoso che ha comportato la mobilizzazione del corpo P1 nel passato geologico, ove però non si esclude il perdurare di una attività di movimenti di pendio estremamente lenti. Questa verticale, inoltre, è situata al bordo di una frana secondaria. I dati inclinometrici sono mostrati in Figura 1.48. Il grafico di spostamento cumulato orizzontale lungo il tubo inclinometrico non mostra particolari zone di localizzazione della deformazione, bensì da evidenza ad una inclinazione della tubazione inclinometrica che comporta un piccolo spostamento cumulato verso sud-est a 4 m di profondità, di soli 4 mm. A profondità minori il grafico presenta una cuspide, probabilmente connessa a locali deformazioni della tubazione (Figura 1.48). Si ritiene di non potersi esprimere in maniera esaustiva sulla tendenza evolutiva in questa zona e, pertanto, si rimanda all'analisi di futuri dati inclinometrici per l'accertamento della significatività degli spostamenti osservati fino ad oggi.

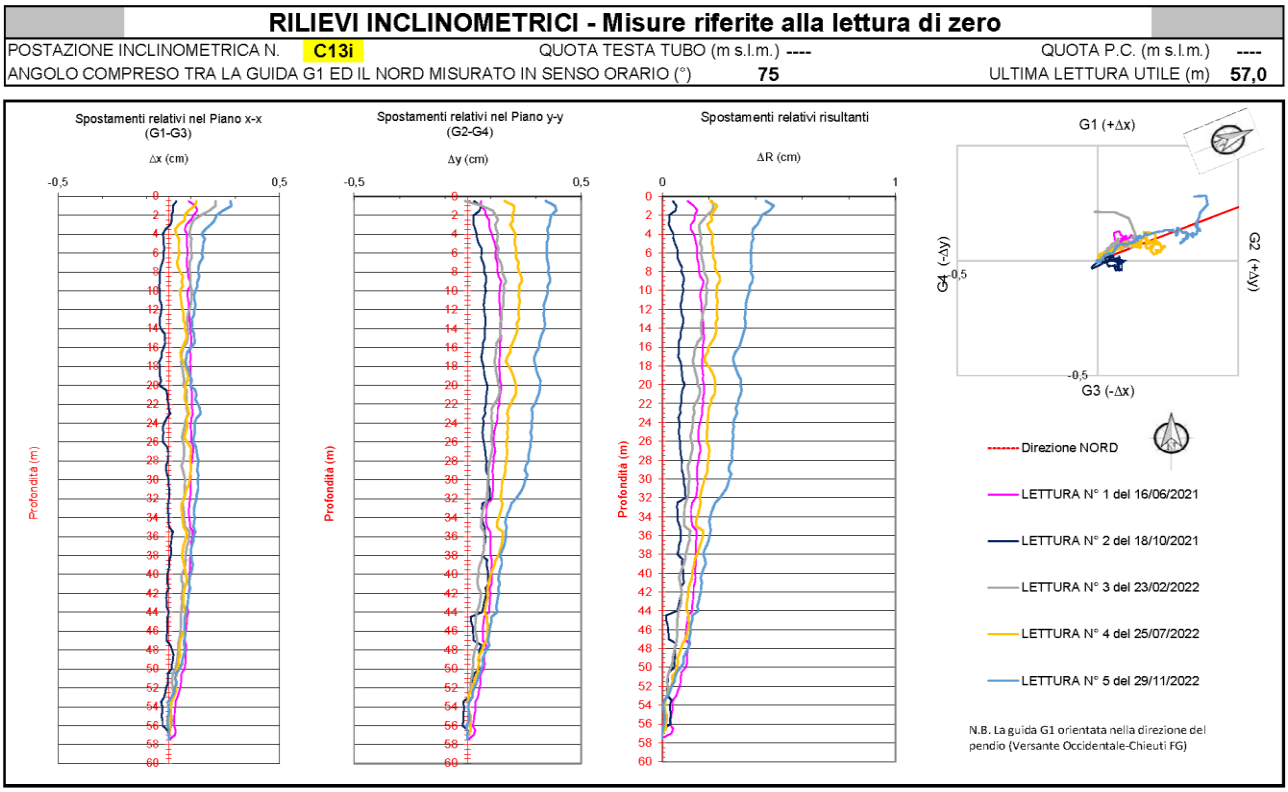


Figura 1.47 Inclinometro C13i: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 22/02/2021.

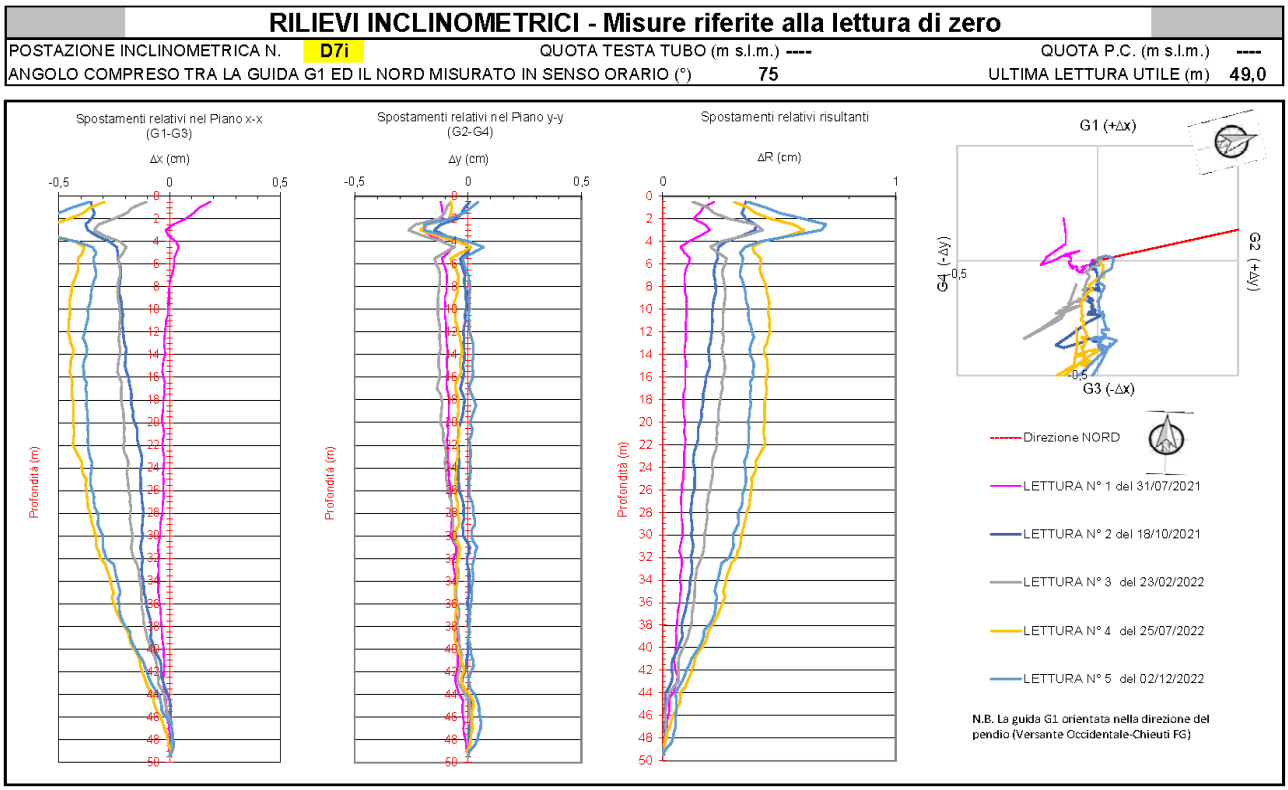


Figura 1.48: Inclinometro D7i: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 22/02/2021.

La verticale inclinometrica C14i è posizionata nel settore Nord del paese ed è di 50 m di profondità. Come si evince dai dati di Figura 1.49, lo spostamento orizzontale cumulato è pressoché nullo (<2mm) a tutte le profondità. Si riscontrano dei segni di deformazione alla profondità di circa 44 m da p.c., monitorati nell'ambito delle ultime due letture, che però non possono essere attribuiti a localizzazione della deformazione deviatorica, ma possono essere connessi invece ad imperfezioni nel giunto della tubazione inclinometrica.

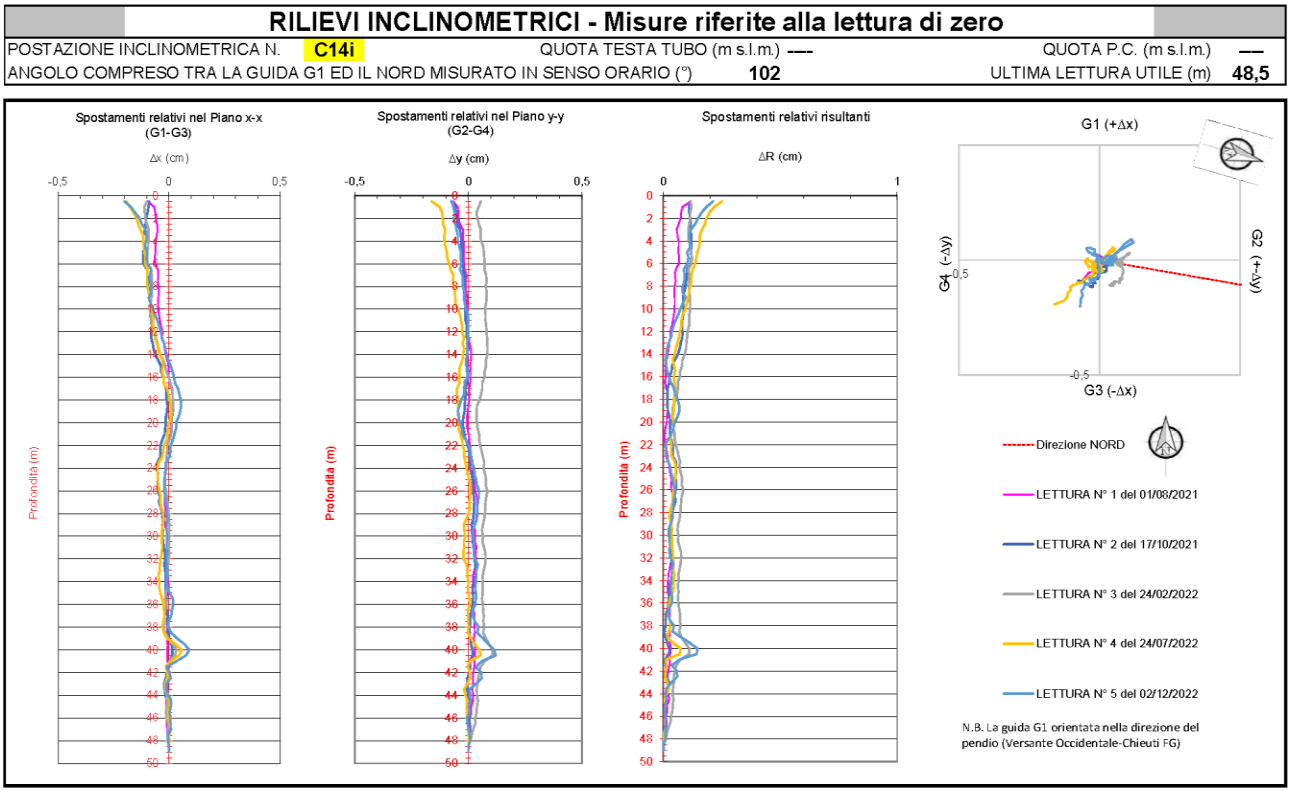


Figura 1.49: Inclinometro C14i: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 25/02/2021.

L'inclinometro C5i è posizionato nel settore nord-orientale del paese. La Figura 1.50 ne mostra i dati inclinometrici, facendo evincere che il profilo degli spostamenti cumulati orizzontali (Figura 1.50) non fornisce evidenza di zone di localizzazione della deformazione. In particolare, tutte le deformate inclinometriche, e soprattutto la quarta lettura, sono coerenti nell'indicare una larga zona, compresa tra 48 e 20 m da p.c., nella quale lo spostamento cresce linearmente col ridursi della profondità (Figura 1.50). A profondità minori di 20 m, invece, lo spostamento è costante. Lo spostamento a piano campagna raggiunge il valore di 4 mm verso ovest, ossia in una direzione opposta rispetto a quella attesa, dato che tale inclinometro si colloca alla testa del versante orientale del paese. Si ritiene, pertanto, che sia necessario attendere i prossimi rilievi inclinometrici per accertare la significatività degli spostamenti lungo tale inclinometro.

Se si integrano i dati inclinometri dianzi discussi con le interpretazioni basate sui dati geomorfologici e geomatici, si riscontra che la parte di piede della banda di taglio comune ai corpi P1 e P2 è profonda circa 50 m nell'area in cui si colloca l'inclinometro C12i. Tale banda di taglio diventa più profonda nella parte centrale del versante, come previsto per corpi in scivolamento roto-traslativo. Tale scivolamento si è esteso a coinvolgere la parte sud del versante, con scarpata SR, ove gli inclinometri C10i, D16i e C2i documentano

una notevole profondità della banda di taglio (circa 50 m nel C10i) anche in questa porzione laterale a sud del bacino franoso. Al contempo, gli inclinometri che si collocano in zona centrale del bacino franoso, ossia andando da valle verso monte: D11i, C15i, D8i e C6i, benché relativamente profondi, appaiono tutti non avere piede installato in zona stabile, tanto da suggerire una profondità massina del corpo P1 anche possibilmente superiore a 70 m. In particolare, gli inclinometri D8i e C6i, profondi 50 m circa, non essendo intercettati dalla banda di taglio appaiono confermare la sub-verticalità della banda di taglio all'emersione in scarpata (sia lungo la SR1, sia lungo la SR2). Al contempo, gli inclinometri C3i e C4i suggeriscono che non è significativa l'attività attuale di un'ulteriore retrogressione della scarpata rispetto alla SR2. Una maggiore attività localizzata della deformazione è invece messa in evidenza dal più recente rilievo inclinometrico lungo la verticale C9i. Lungo tale inclinometro, infatti, si è riscontrata l'attività, a 24 m, della banda di taglio in scarpata del processo franoso S2, che si raccorda con la scarpata SR1 nel tratto sede dei tiltmetri CE03 e CE04 (ove il marciapiede del belvedere risulta più danneggiato), anch'essi indicativi di una recente attività di tale porzione di scarpata.

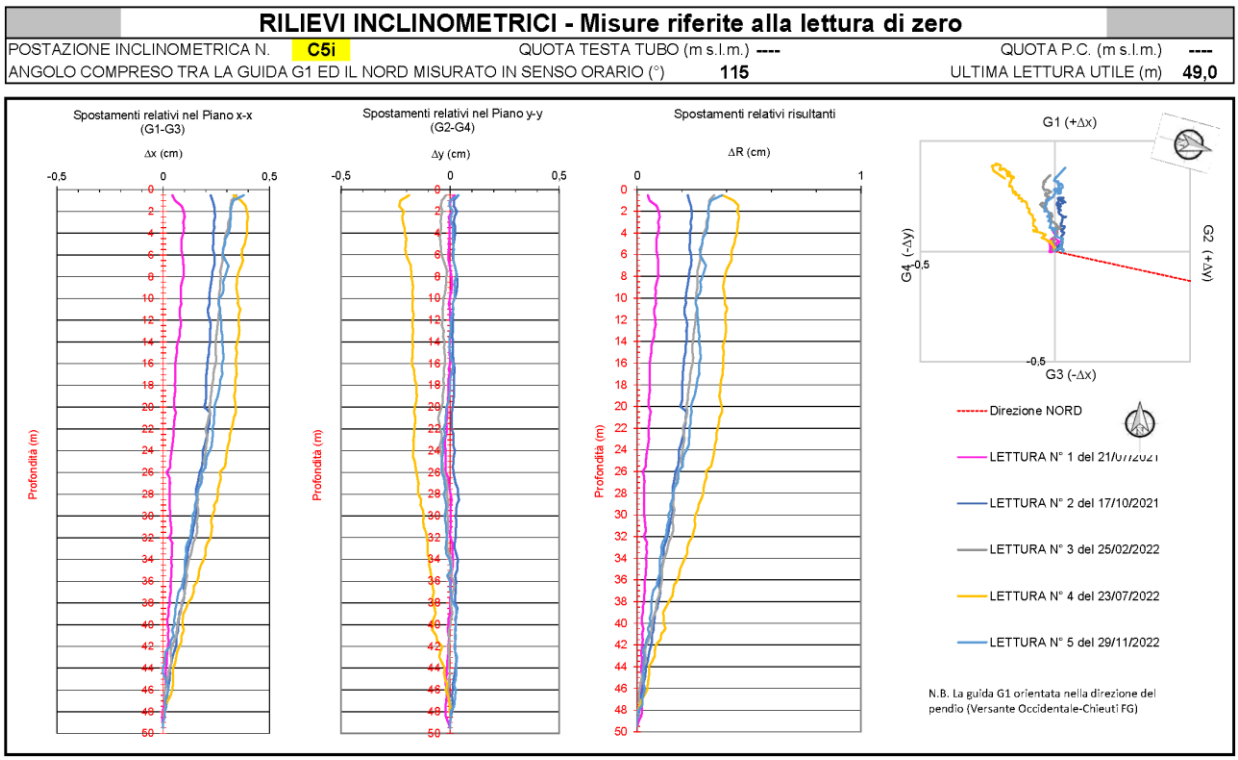


Figura 1.50: Inclinometro C5i: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 25/02/2021.

1.2.2 Inclinometri campagna geognostica INGE (2013)

Come già anticipato nel paragrafo precedente, nel 2022 si è proseguito anche col monitoraggio delle tubazioni inclinometriche ancora accessibili installate da INGE nel 2013. Queste sono: 13S1ci, 13S2ci, 13S3ci, 13S6ci e 13S7ci. Di queste cinque tubazioni, però, solo la 13S3ci risulta accessibile lungo l'intera profondità di 49 m. Durante i rilievi del 2018 e del 2019, la tubazione inclinometrica 13S7ci era risultata accessibile fino alla profondità di 25 m da p.c., dove si sospettava che una eccessiva deformazione del tubo inclinometrico impedisse l'ulteriore discesa della sonda inclinometrica. Successivamente, durante il primo rilievo svolto da APOGEO, alla fine del 2020, fu riscontrato che la tubazione inclinometrica era occlusa al suo interno,

probabilmente per un corpo estraneo, alla profondità di 15 m dal p.c.. Purtroppo, a causa di questa circostanza, il monitoraggio inclinometrico di questa tubazione è stato successivamente effettuato da APOGEO solo fino a tale profondità.

Per tutti gli inclinometri risultati non totalmente accessibili fino al fondo foro, ovvero per il 13S1 (lunghezza iniziale: 40m; lunghezza accessibile: 25,5m), per il 13S2 (lunghezza iniziale: 33m; lunghezza accessibile: 15,5m), per il 13S6 (lunghezza iniziale: 36,5m; lunghezza accessibile: 35m) e per il 13S7 (lunghezza iniziale: 39m; lunghezza accessibile: 24m) quindi, il monitoraggio è stato svolto solo nella parte superiore al piegamento o all'occlusione del tubo.

Sono state eseguite quindi cinque letture, successive ad una lettura di zero effettuata nel Febbraio 2021: la prima a metà Giugno 2021, la seconda a metà Ottobre 2021, la terza a Febbraio 2022, la quarta a Luglio 2022, e l'ultima, la quinta, a Dicembre 2022 (Tabella 1.6).

L'andamento degli spostamenti orizzontali cumulati con la profondità lungo l'inclinometro 13S1ci, in Figura 1.51, non indica zone di localizzazione della deformazione, bensì da evidenza ad una rotazione del tubo inclinometrico verso Est, coerente con il coinvolgimento della porzione superiore del tubo inclinometrico nel cuneo di retrogressione, che nella mobilizzazione verso valle può comportare una rotazione verso monte della parte alta della verticale in scarpata.

Purtroppo, nell'ambito della quarta misura (Luglio 2022) è stata riscontrata la presenza di un corpo estraneo che ha occluso la tubazione inclinometrica, non consentendo quindi ulteriore monitoraggio del tubo inclinometrico.

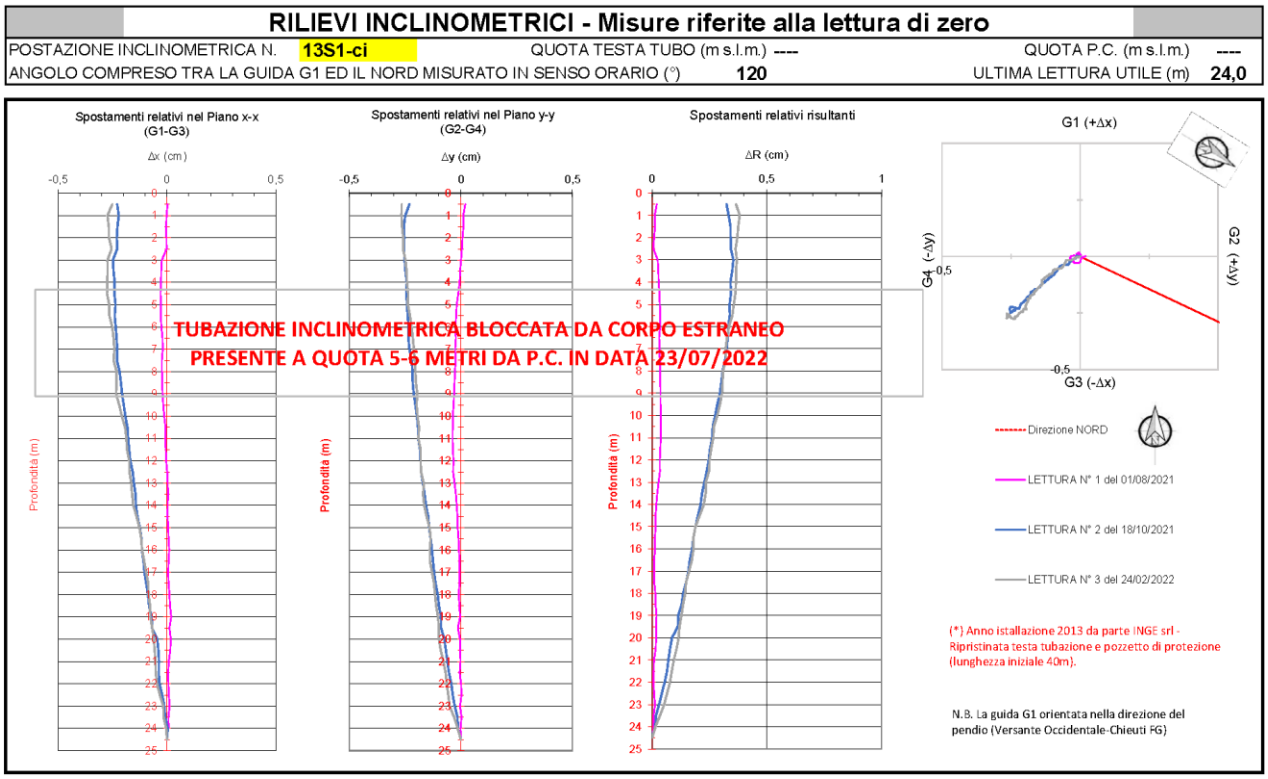


Figura 1.51: Inclinometro 13S1ci: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 24/02/2021.

La Figura 1.52 riporta i risultati del monitoraggio inclinometrico effettuato lungo la verticale 13S2ci. Il grafico

di spostamento cumulato orizzontale non mostra zone di localizzazione della deformazione. Tutte le letture disponibili non mostrano spostamenti apprezzabili, il che è coerente con la collocazione della banda di taglio ad una maggiore profondità. Si ricorda, infatti, che, anche per questo inclinometro, è stata riscontrata la presenza di un piegamento a 15 metri da p.c. Si riscontra però, in relazione alle ultime due misure, uno spostamento superficiale tra i 4 m di profondità ed il piano campagna (verso Est), che è potenzialmente correlato a fenomeni di instabilità superficiali nella zona del corpo S1.

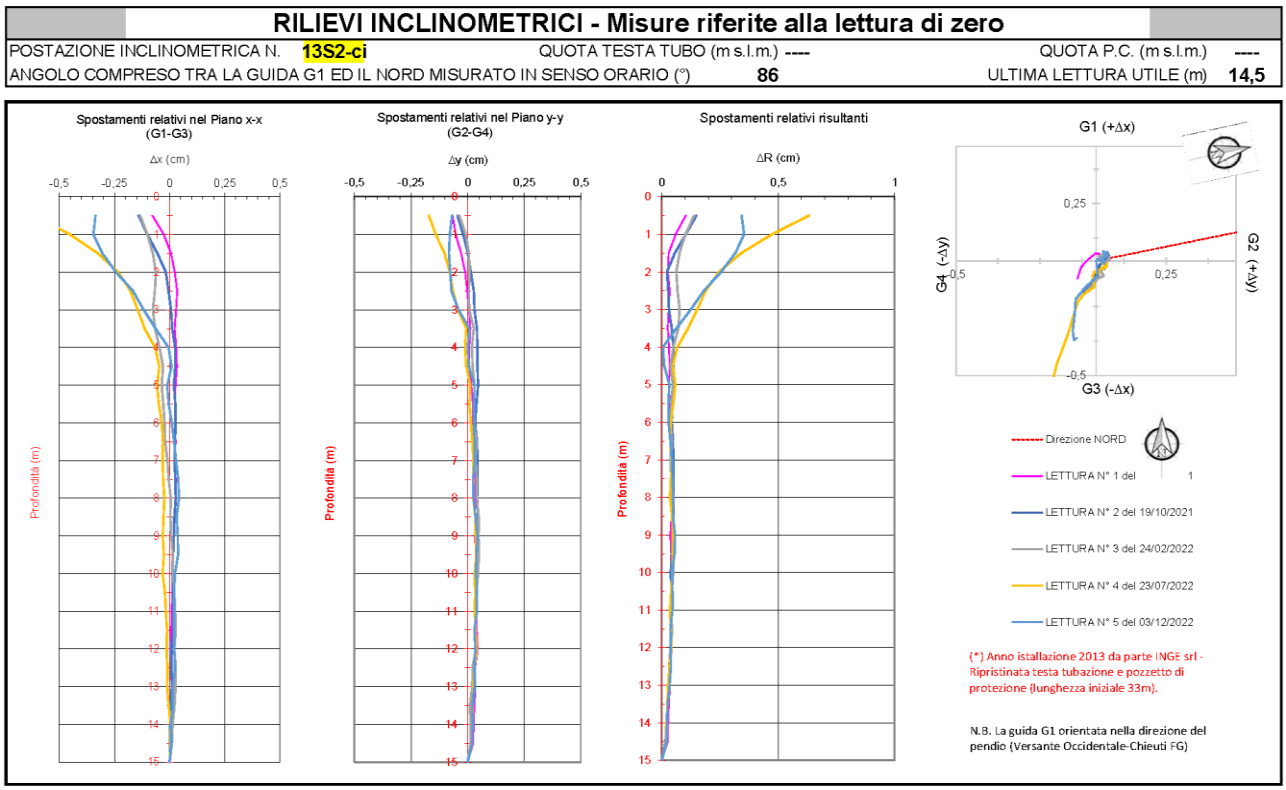


Figura 1.52: Inclinometro 13S2ci: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 23/02/2021.

In Figura 1.53 sono mostrati i dati ottenuti per la verticale 13S3ci. Il grafico di spostamento cumulato non evidenzia chiare zone di localizzazione della deformazione a nessuna profondità, nonostante l'ultima lettura evidenzi uno spostamento di poco più di 4 mm verso Sud a piano campagna che si realizza su tutta la profondità dell'inclinometro, senza che si manifestino chiare zone di localizzazione. Come nei casi precedenti, si ritiene di non potersi ancora pronunciare circa il cinematismo legato alla franosità verso Est in questa zona.

Gli spostamenti cumulati orizzontali del tubo inclinometrico 13S6ci (Figura 1.54) misurati durante i rilievi inclinometrici condotti fino a Dicembre 2022, non mostrano nette zone di localizzazione della deformazione, ed inoltre gli spostamenti totali a piano campagna sono inferiori a 2 mm. Unitamente a ciò, anche in questo caso la direzione in pianta dello spostamento non è univoca, nonostante le ultime quattro letture mostrino spostamenti che tendono ad essere indirizzati verso Nord-Ovest. Pertanto, non è possibile ancora pronunciarsi circa il cinematismo legato alla franosità in questa zona per tale verticale.

In Figura 1.55 vengono mostrati i dati di monitoraggio inclinometrico relativi alla verticale 13S7ci, risultata indagabile solo nei primi 15 m da p.c. Il grafico di spostamento cumulato orizzontale indica una potenziale zona di leggera localizzazione della deformazione a circa 11,5 m di profondità da p.c., ricorrente e confermata

quindi dalle ultime tre letture. La direzione in pianta dello spostamento a 11m di profondità pare essere indirizzato verso Sud-Est, nonostante esso poi devii, più intensamente verso Nord-Ovest (dalla profondità di circa 10m), in assoluta coerenza la direzione del processo franoso S1. Anche in relazione a questo inclinometro, però, si ritiene che non sia ancora possibile pronunciarsi definitivamente circa il cinematismo legato alla franosità.

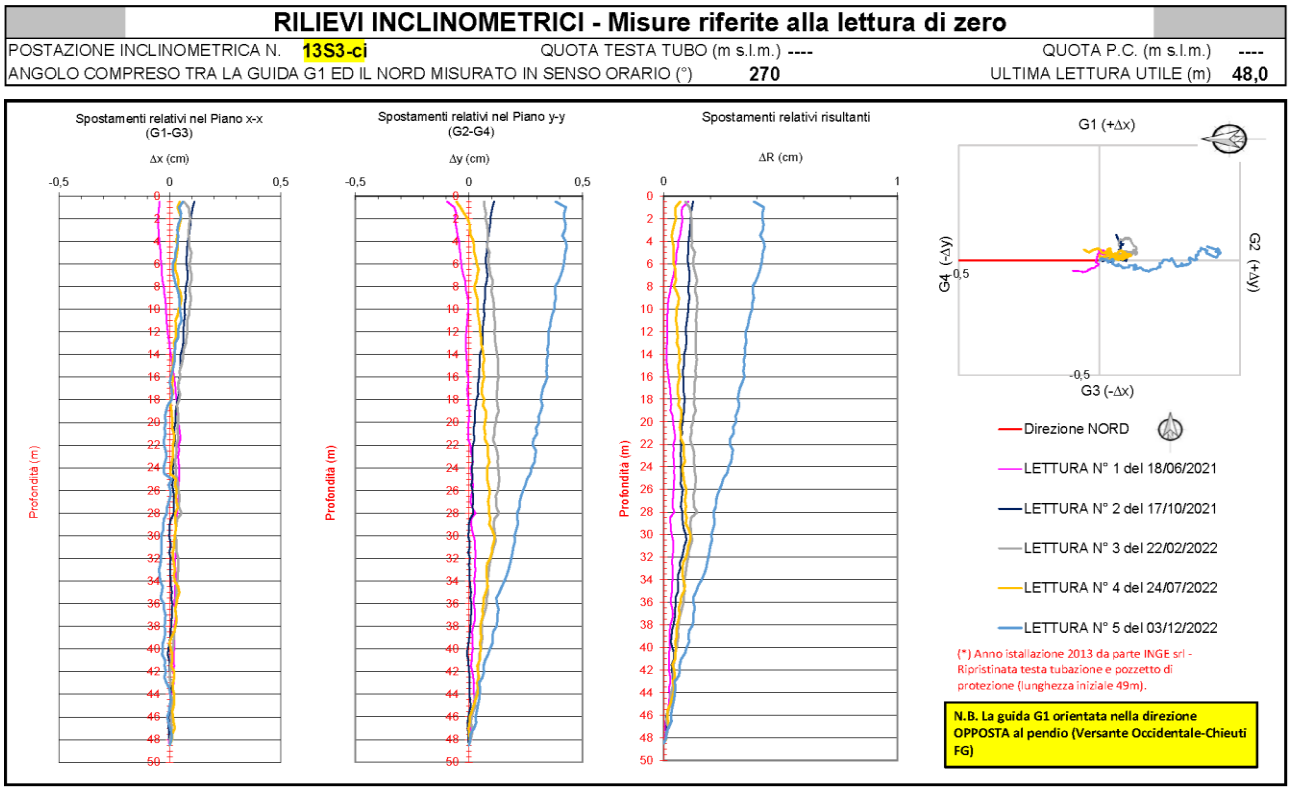


Figura 1.53: Inclinometro 13S3ci: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 03/02/2021.

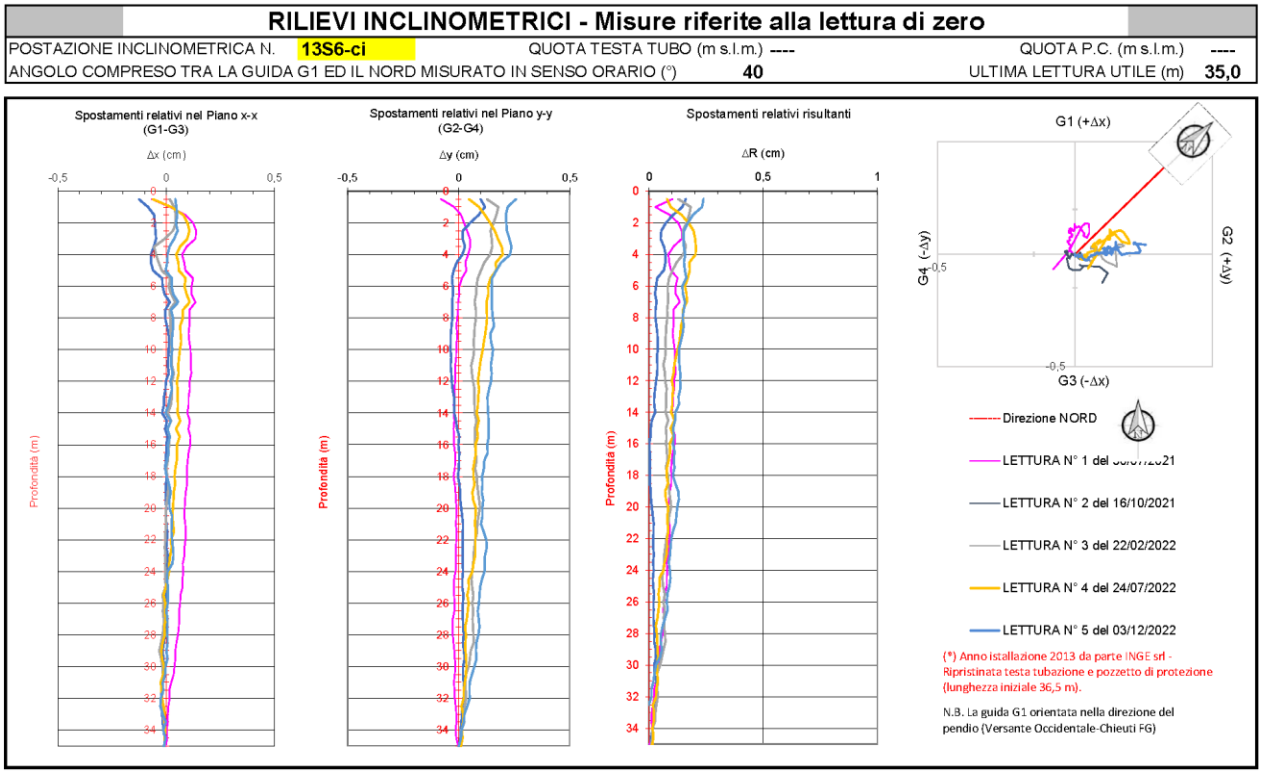


Figura 1.54: Inclinometro 13S6ci: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 3/02/2021.

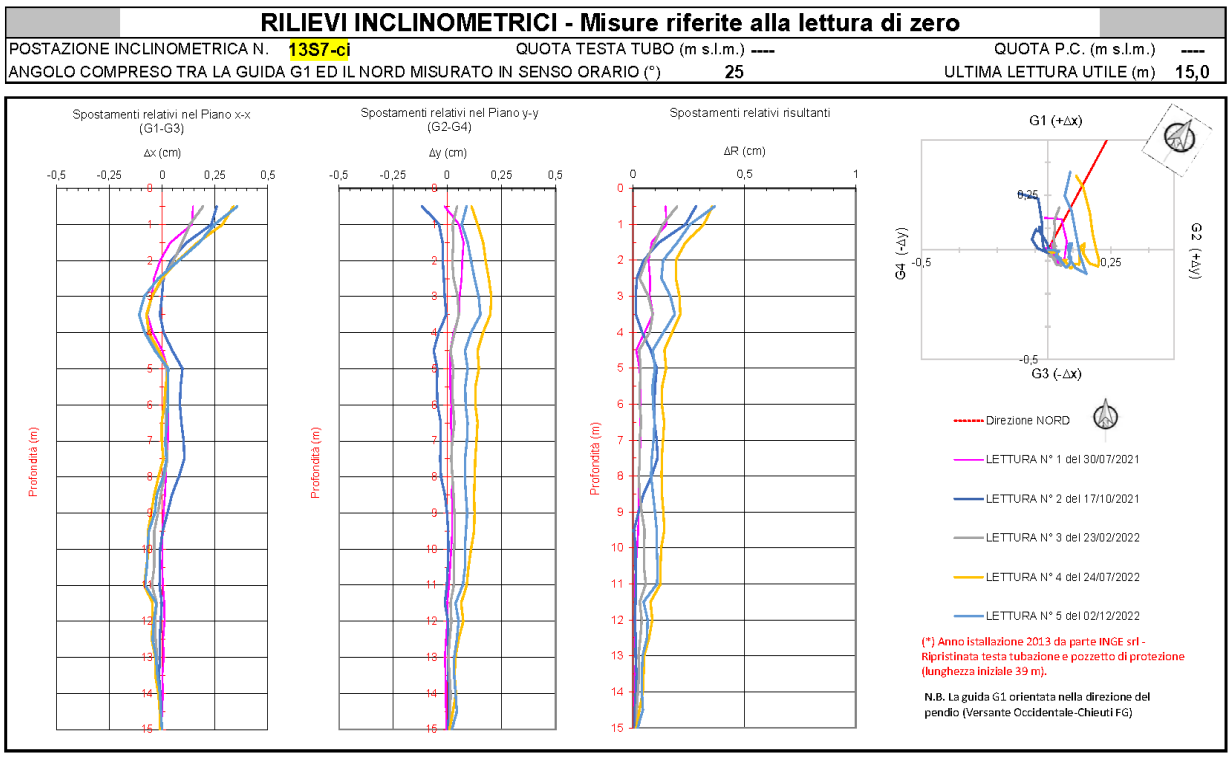


Figura 1.55: Inclinometro 13S7ci: spostamento cumulato e andamento della direzione azimutale; Lettura di zero: 24/02/2021.

1.3 Evoluzione del danno

Nel maggio 2022 sono stati effettuati ulteriori sopralluoghi per il rilievo dell'evoluzione dello stato di danneggiamento dell'edificato, da confrontarsi con quello rilevato nel periodo 2018-2021, ampiamente descritto nella I Relazione di II fase (Capitolo 2 e Allegato 4). I rilievi del 2022 hanno confermato la

collocazione spaziale degli edifici e dei tratti di pavimentazione stradale più danneggiati, che ricadono nell'area ove sono state registrate velocità di spostamento verticale di circa 10 mm/anno (§1.1).

Inoltre, durante i rilievi del 2022 è stato possibile rilevare con accuratezza sia i dissesti della sede stradale nella piazzetta a Sud, tra Via Martiri di Via Fani e via Mantini, ove ricadono i sondaggi C3di e C2i (abbassamenti e lesioni; Figura 1.56), sia le lesioni del manto stradale di Via Martiri di Via Fani. Contestualmente è stato possibile osservare con maggiore attenzione lo stato di danneggiamento del prospetto Ovest (Figura 1.57) e dei muretti del cortile (Figura 1.58) della casa INA.

Le lesioni della pavimentazione stradale in Figura 1.25 c presentano uno sviluppo circa parallelo al ciglio del versante occidentale, parallelo alla scarpata SR (Figura 1.25); da esse si dirama un fascio di lesioni, mostrato in Figura 1.56 a e b che rappresenta il prolungamento verso SO delle lesioni nel pavé della piazzetta all'incrocio tra via Martiri di via Fani e via Mantini. Questo fascio si sviluppa prima secondo la direzione SSO, e poi prosegue verso SO-O, verso l'aiuola in cui alcuni alberi sono stati recentemente piantati (Figura 1.56). Come si evince dalle foto di Figura 1.59, nell'aiuola citata la copertura arborea aveva una maggiore estensione rispetto a quella attuale nel 1998 e nel 2009. La Figura 1.57 riporta le foto del prospetto Ovest dell'edificio INA scattate durante il sopralluogo del 11 Maggio 2022, dalle quali si evince la presenza di una fessura diagonale che attraversa il lato settentrionale del prospetto, estendendosi dal secondo piano fino al tetto dell'ingresso del garage sottostante. Contestualmente sono stati rilevati dissesti nel cortile e sul muro di cinta della casa (Foto a-c di Figura 1.58). L'edificio non è riconoscibile nelle foto aeree del 1954 (Figura 1.60), per cui è di costruzione successiva. Infatti, nelle foto aeree del 1976 e del 1991 (Figura 1.60), nella stessa posizione era presente un edificio diverso da quello attuale, presumibilmente demolito e ricostruito tra il 2003 ed il 2006 (Figura 1.60). Infatti, la forma e le dimensioni dell'edificio presente nelle immagini del 1991e del 2003 non sono confrontabili con quelle dell'edificio attuale, mentre lo sono quelle dell'edificio fotografato nel 2006 (Figura 1.60). L'edificio precedentemente collocato in questa zona è stato quindi demolito e un nuovo edificio è stato costruito poco più a monte del precedente, ma nella stessa zona (ordinanza di sgombero emessa dal Comune verso la fine degli anni' 90; Capitolo 1 della I R. di II Fase). Infine, è ben evidente nelle fotografie aeree come la copertura boschiva dell'aiuola posta immediatamente a Nord dell'attuale edificio INA sia cambiata successivamente al 2019 (Figura 1.60).



Figura 1.56: A) Ortofoto del 2020 con l'ubicazione dei toponimi delle strade richiamati nel testo insieme a quella dei sondaggi terebrati nella campagna geognostica 2020-21 (quadrato nero: sondaggio a distruzione; cerchio rosso: sondaggio a carotaggio continuo) e delle foto del riquadro B; B) dissesti della sede stradale nel settore sud di Viale Martiri di Via Fani nel Maggio 2022.



Figura 1.57. A) Ortofoto del 2020 con l'ubicazione delle foto del riquadro B richiamate nel testo; B) Fessure diagonali presenti lungo il lato settentrionale del fronte occidentale della casa INA nel Maggio 2022.



Figura 1.58. A) Ortofoto del 2020 con l'ubicazione delle foto del riquadro B richiamate nel testo; B) Dissesti al cortile e al muro di cinta della casa INA di Figura 1.3.2 nel Maggio 2022.



Figura 1.59. Foto dell'aiuola ubicata immediatamente a Nord delle case INA di Figura 1.3.4 nel 2009 (a; ripresa street view in google earth) e nel 1998 (b; Relazione GNDCI del 1998; Figura 1.3.9 della R. I Fase).

In questo contesto è importante evidenziare che le fessurazioni del prospetto ovest della casa INA erano già

risultate evidenti durante le ispezioni visive effettuate degli esperti dello studio PPV Consulting nel Giugno del 2020, come riportato nella Relazione Finale "Valutazione del danno, mediante ispezioni visive, di alcuni edifici dell'abitato di Chieuti (FG) a firma dello studio PPV Consulting (Capitolo 2 della R. II Fase).



Figura 1.60. Stralci delle foto aeree (1954, 1976, 1991) dell'immagini di google earth (2003, 2019) e delle ortofoto (2006 e 2020) del settore del versante dove le case INA sono state fondate.

1.4 Aggiornamento dell'interpretazione dell'assetto geomorfologico

Un aggiornamento dell'interpretazione dell'assetto geomorfologico del versante e della morfologia dei corpi franosi, rispetto a quella riportata nella I Relazione di II Fase, è stato desunto dall'integrazione dei dati e dell'interpretazione discussi nella I Relazione di II Fase con i dati sin qui discussi nel presente capitolo. Sono stati altresì contemplati i risultati di un'ulteriore analisi di documenti storici (atti amministrativi, ecclesiastici, sociali e giudiziari, cartografie storiche etc.) conservati nella sede sussidiaria dell'Archivio di Stato di Foggia (presso il Palazzo Dogana), che riguardano la porzione occidentale del centro storico di Chieuti.

L'approfondimento dello studio dei documenti di archivio è stato svolto al fine di rendere più realistica possibile la ricostruzione dell'evoluzione storica della retrogressione del processo franoso (aggiornamento dei contenuti dei Capitoli 5 e 6 della I Rel. di II Fase), circoscrivendola sia temporalmente che arealmente in modo più accurato. Tale approfondimento è stato, inoltre, anche volto a conoscere l'evoluzione nell'uso del suolo sul versante, dato che tale uso può aver modificato l'assetto piezometrico nel versante e, quindi, la distribuzione delle resistenze disponibili, incidendo così sulla sua stabilità e sulle dinamiche di progressione della rottura nel tempo. Purtroppo, però, non si sono potute rintracciare le auspicate notizie sull'uso del suolo lungo il versante nel tempo.

I documenti storici esaminati, aggiuntivi rispetto a quelli discussi nella I Relazione di II Fase, risalgono in gran parte al XIX secolo e riguardano la vita amministrativa e sociale del territorio ove ricade l'abitato. In particolare, all'interno del fondo archivistico "Intendenza, Governo, Prefettura di Capitanata – Affari comunali II Serie – Da Chieuti a Foggia - Volume 3" è stato ritrovato un documento in cui sono riportate notizie di eventi franosi coinvolgenti il versante in esame. Trattasi di una lettera scritta l'11 Febbraio 1830 al Sig. Intendente di Capitanata, in cui si descrivono i danni subiti da alcune case del Comune di Chieuti. La lettera include anche una pianta schematica dell'abitato, con indicazione dello stato di danneggiamento dei fabbricati. Uno stralcio della lettera, insieme alla pianta, è mostrata in Figura 1.61. Come si evince dalla lettera "*una porzione dell'abitato di Chieuti è notabilmente lesionata, diverse case sono cadute, tra le quali giorni fa due soprani, e molte altre minacciano prossima rovina. Si ripete questa triste novità dal sottoposto terreno che va cedendo di tratto in tratto, novità che è cominciata da parecchi anni, e che si è aumentata di molto nell'anno scorso….*". E' di notevole importanza riscontrare come nella pianta in Figura 1.61. la linea ondulata CD, che attraversa i fabbricati crollanti nel 1830, appare sovrapporsi all'attuale scarpata SR2 (Figura 1.25), evidentemente già allora attiva da tempo. Va altresì notato che, però, nel 1830 il muro di cinta occidentale era ancora continuo (Figura 1.61); tale continuità veniva interrotta successivamente, non essendo più rilevabile nella cartografia del 1909 (Figura 2.1.3 della I Rel. di II Fase).

La Figura 1.62 mostra la carta litostratigrafico-geomorfologica del versante conclusiva, aggiornata rispetto a quella della I Relazione di II Fase, che completa quella in Figura 1.25 e sostituisce quella della Figura 6.4.6 della citata I Relazione di II Fase. Essa mostra anche l'andamento in pianta degli spostamenti orizzontali registrati, per alcune verticali inclinometriche, lungo bande di taglio e/o zone di localizzazione della deformazione (§1.2); tali spostamenti sono indicati con vettori rossi. Inoltre, sulla mappa sono mostrate, con vettori tratteggiati blu, le proiezioni orizzontali delle deformate di alcune tubazioni inclinometriche, ove considerate più significative e generate da misure affidabili (ancorchè di spostamenti molto piccoli) degli spostamenti. La legenda in figura indica la scala dei vettori spostamento.

La Figura 1.62 mette in evidenza, quale elemento più significativo di completamento, l'estensione verso Sud dell'area di alimentazione del processo franoso profondo, per cui nella figura la scarpata SR si sviluppa sino all'aiuola davanti alla casa INA ricostruita successivamente al 2003 (Figura 1.59). La scarpata SR, infatti, prosegue verso sud-ovest (Figura 1.62), causando sia il dissesto del muretto del cortile del fabbricato INA più recente (Figura 1.58) e delle pareti del garage interrato, sia della parete in affaccio verso ovest, nella parte nord

del fabbricato (Figura 1.58). D'altronde, il qui identificato settore meridionale della scarpata dell'ampio bacino franoso, in cui ricade anche la scarpata del processo S1, è stato sede di significativi cedimenti differenziali recenti, rilevati dai monitoraggi geomatici discussi nel §1.1., ed è altresì sede di rotazioni del muro su pali rilevate dai tiltimetri CE07 e CE08, installati sul muro (Figura 1.27 e Figura 1.28).

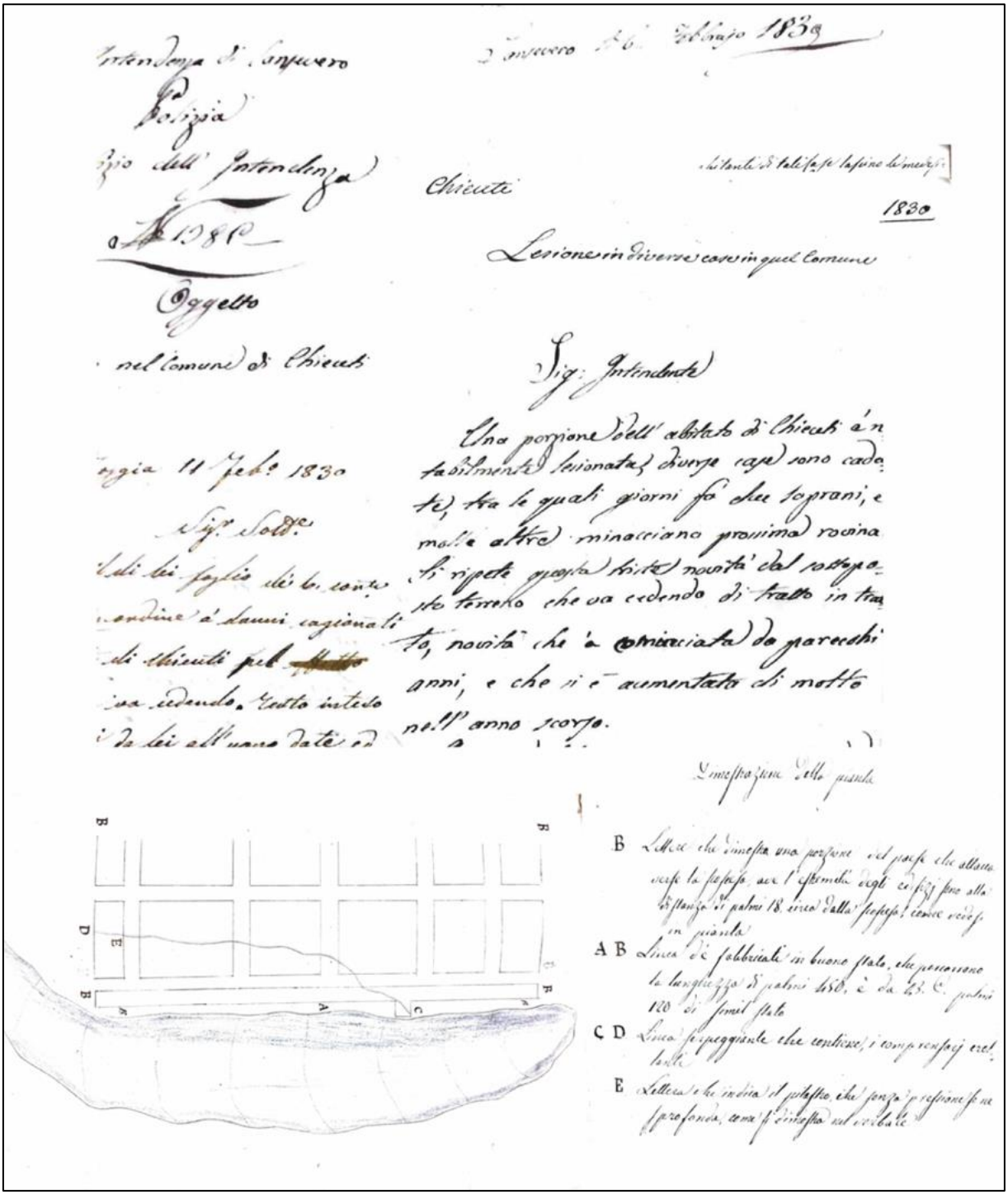


Figura 1.61: Stralcio di una lettera inviata all'Intendente della Capitanata nel 1830 (Archivio di Stato di Foggia; muro di cinta: linea di fabbricati lungo linea BB)

L'intero bagaglio di dati di rilievo e monitoraggio, quindi, complessivamente suggerisce che, nella parte meridionale del versante occidentale di Chieuti, il processo franoso si sia esteso a coinvolgere volumi di terreno

che vanno dal bordo meridionale del corpo P1 sino all'affluente sud del Vallone del Fico, mostrati tratteggiati in Figura 1.62. Sulla base dei dati di archivio, si avanza l'ipotesi che tali volumi configurino un recente ampliamento verso sud-ovest del processo franoso. Le masse in frana nella parte meridionale possono o configurare un ampliamento verso sud del corpo di frana P1, o, alternativamente, configurare un corpo ad esso adiacente, la cui attività è comunque connessa all'interazione con il corpo P1. Non essendo chiaro il cinematismo di queste masse, nella carta geomorfologica aggiornata in Figura 1.62 tale porzione meridionale è stata indicata semplicemente come "area in frana".

La stessa figura riporta come "area in frana" anche la porzione del versante compresa tra il fianco settentrionale dei corpi P1 e P2 e l'affluente settentrionale del Vallone del Fico, ove le morfologie franose si presentano oggi fortemente smantellate dall'azione erosiva delle acque di ruscellamento e dai ricorrenti fenomeni franosi, di media profondità o superficiali, localizzati a ridosso delle sponde del fosso. Si evidenzia, infatti, che la Figura 1.34 e la Tabella 1.5 riportano dei dati di monitoraggio topografico indicativi di spostamenti relativamente significativi in quest'area nel versante, giustificando l'evidenziarla come ancora sede di una franosità attiva, ancorchè molto matura (si tratta presumibilmente della parte del versante svuotatasi di più nel passato geologico).

Ulteriore modifica della carta geomorfologica precedentemente mostrata nella I Relazione di II Fase riguarda le dimensioni dei corpi secondari S2, S2A e S2B, che coinvolgono un'area intensamente elaborata dall'azione antropica (riporto, muri di contenimento, uso del suolo etc.), che nel corso del tempo ha cancellato i limiti morfologici dei corpi di frana, quindi riportati con linea tratteggiata in Figura 1.62. È importante evidenziare che i dati di monitoraggio topografico ed inclinometrico (§1.1. e 1.2) evidenziano come le aree di alimentazione dei corpi S2 e S2A (Figura 1.62) risultino essere le più attive lungo la scarpata SR1.

Le Figura 1.63 Figura 1.64 mostrano le sezioni longitudinali C, D ed E (tracce in Figura 1.62), che attraversano sia i corpi di frana profondi, P1* e P2, che quelli più superficiali (ad. S1 in sez. D e S2 in sez. C ed E); sono mostrate le diverse superfici di scorrimento emergenti lungo le scarpate SR, SR1 e SR2. La Figura 1.62 mostra anche la traccia di una nuova sezione, K (Figura 1.64), che attraversa longitudinalmente la frana S2 ed intercetta la verticale inclinometrica C9i. L'andamento delle diverse bande di taglio riportate nelle sezioni scaturisce dall'integrazione dei dati inclinometrici e litostratigrafici con quelli rilevati in superficie (elementi geomorfologici di superficie e dati geomatici). Si conferma, dunque, che l'integrazione di tutti i dati a disposizione porta a riconoscere che i corpi di frana principali nel versante possono essere significativamente profondi, come delineato nello schema in Figura 1.25b.

Si fa però presente che, ove il meccanismo franoso viene schematizzato nelle Figure 1.63 e 1.64 delineando le bande di taglio principali nel versante (plausibilmente sede delle più avanzate deformazioni di taglio), che confinano masse di terreno in moto molto lento, le deformazioni all'interno di tali masse di terreno possono essere sia diffuse e di carattere compressivo laterale (comportando rigonfiamenti in superficie che si manifestano con spostamenti verticali verso l'alto), sia localizzate in ulteriori bande di taglio interne ai corpi di frana principali distinti nelle sezioni. Questa distribuzione spaziale della deformazione, tipicamente effetto di un problema di evoluzione dell'equilibrio nel tempo in un sistema a comportamento elasto-plastico quale è

il versante in studio, contribuisce al campo di spostamenti lenti sul versante. Dunque, i corpi di frana distinti nelle sezioni non vanno considerati come corpi rigidi in semplice scivolamento lungo le bande di taglio, ma come sede di più complessi campi deformativi ad evoluzione temporale molto lenta.

La porzione di piede della banda di taglio comune ai corpi P1 e P2 è intercettata dall'inclinometro C12i a 48-50 m dal p.c. (sezioni E, C e D; Figura 1.63 Figura 1.64). Questa di dirama verso monte in più bande di taglio principali, che si estendono si ad emergere lungo i gradini morfologici SR0, SRi, SR1, SR2 e SR (Figura 1.63 Figura 1.64).

Nel settore meridionale del versante, la banda di taglio che emerge lungo la scarpata SR (sezione D in Figura 1.64) è intercettata dagli inclinometri C10i, D16i e C2i, alle profondità rispettivamente di 54-56 m, 30-31.5 m e 22-23 m dal p.c. (Figura 1.636, 1.37 e 1.38). È importante anche evidenziare che a maggiori profondità le deformate inclinometriche C2i e D16i appaiono indicare due zone in cui la deformazione tende a localizzarsi (i.e. 45-49 m dal p.c. in C2i e a 45 m dal p.c. in D16i, Figura 1.64), suggerendo possibile ulteriore retrogressione della rottura, verificabile a fronte di un ulteriore prosieguo del monitoraggio.

Proseguendo verso Nord, l'integrazione dei dati di monitoraggio inclinometrico, geomatico e dei tiltmetri, discusso nelle sezioni §0, 1.2 e 1.3 porta a delineare le bande di taglio come indicato nelle sezioni D ed E nelle Figure 1.63 e 1.64. L'attività dei gradini morfologici SR1 e SR2, corrispondenti all'emergenza in superficie delle bande di taglio profonde, comporta cedimenti differenziali del settore occidentale dell'area urbana, in cui la componente verticale degli spostamenti risulta essere molto maggiore di quella orizzontale. Questi abbassamenti sono indotti, quindi, da scorrimenti lungo ripide bande di taglio. Coerentemente, fino ad oggi le deformate inclinometriche lungo le verticali D8i e C6i, ubicate nell'area di scarpata, non presentano localizzazioni della deformazione indicative dell'intercettazione di bande di taglio, suggerendo che tali inclinometri sono interamente inclusi nella massa in frana. Per l'inclinometro C9i, a valle della scarpata SR1, invece, una modesta localizzazione della deformazione in profondità (Figura 1.63, sezione K), suggerisce l'attività locale della banda di taglio dello scorrimento S2, meno profondo rispetto al corpo P1*, che emerge lungo il gradino SR1.

Il tratto ripido delle bande di taglio in emersione lungo SR1 e SR2 coinvolge i terreni delle unità 1, 2 e 3, mentre quello rotazionale-traslativo si attesta nell'unità 3. È importante evidenziare che le bande di taglio connesse ai gradini SR1 e SR2, mostrate nelle sezioni C ed E in Figura 1.63, sono da ritenersi parte di una famiglia di numerose possibili bande di taglio, che non si esclude possano coesistere nella zona retinata in Figura 1.63. Al contempo, è importante sottolineare che anche le scarpate di frane secondarie, quali S2, S2A e S2B (Figure 1.62-1.64), possono essere localmente attive all'interno della scarpata più grande, SR1, come evidenziato in precedenza.

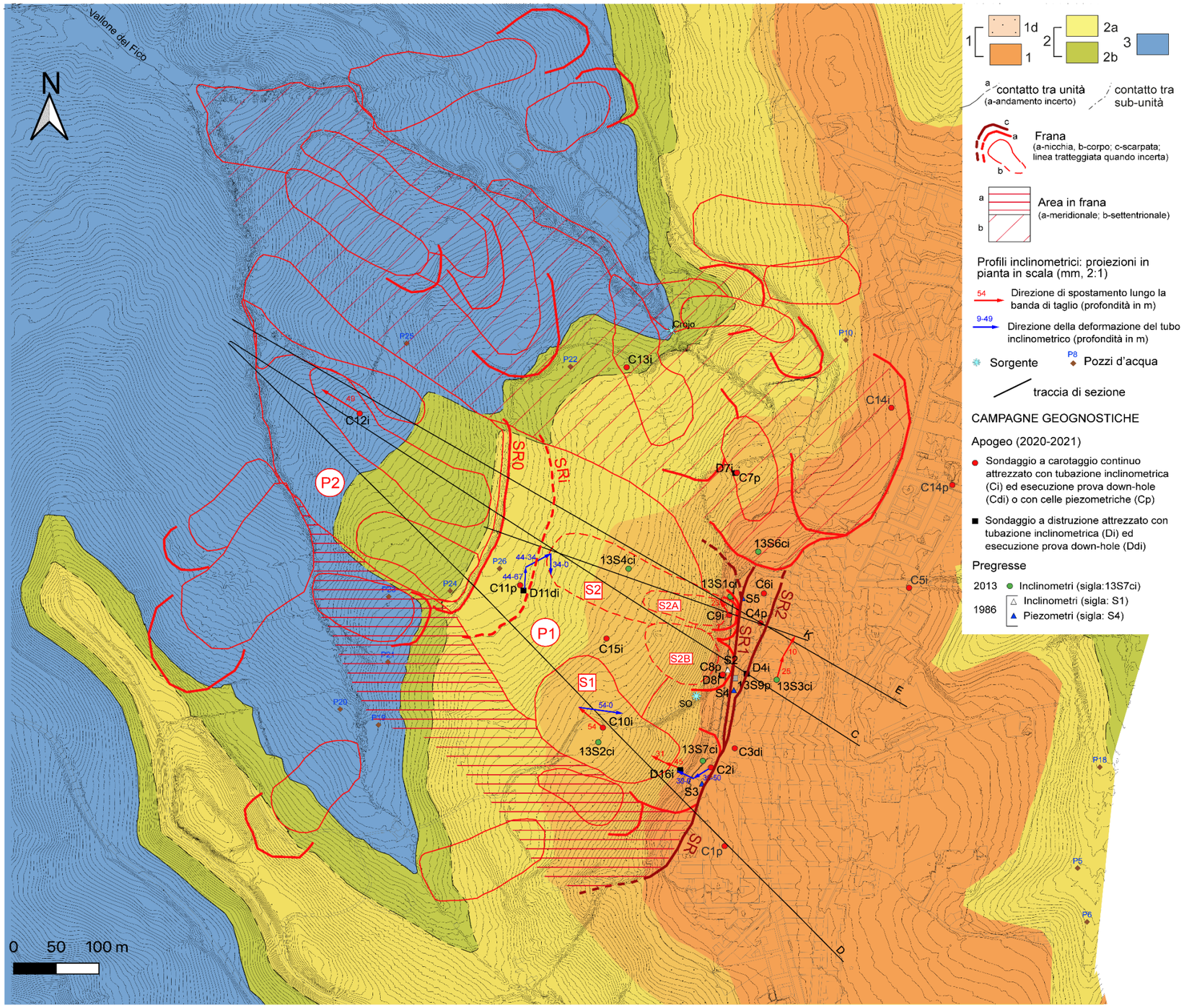


Figura 1.62: Carta litostratigrafico-geomorfologica del versante occidentale di Chieuti finale e andamento planimetrico delle direzioni dell'azimut misurato lungo le bande di taglio intercettate dagli inclinometri o quelle relative alla deformazione del tubo inclinometrico.

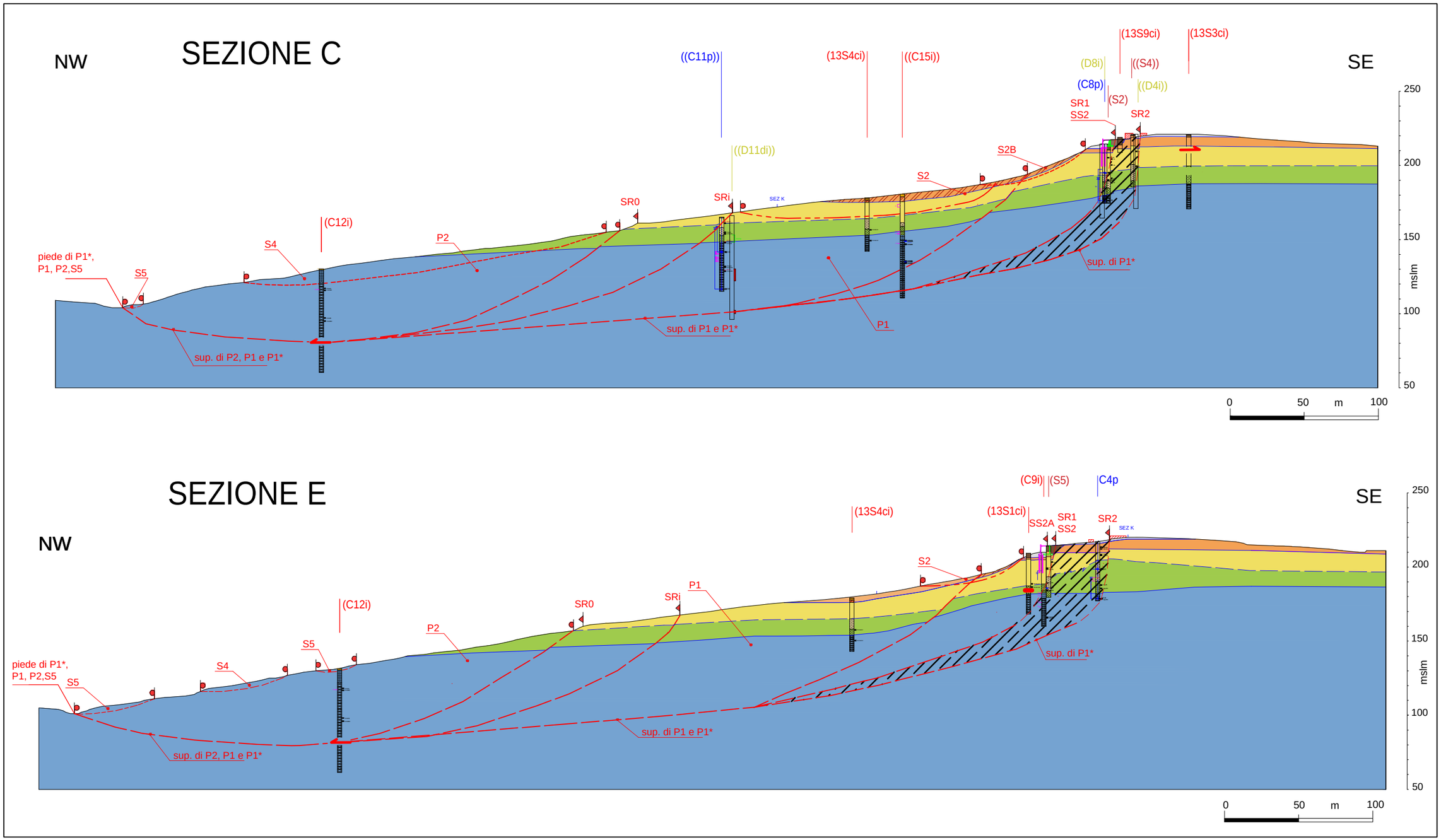


Figura 1.63: Sezioni litostratigrafico-geomorfologiche C e E (ubicazione in Figura 1.62 e legenda in Figura 1.64; il significato del tratto retinato è riportato nel testo).

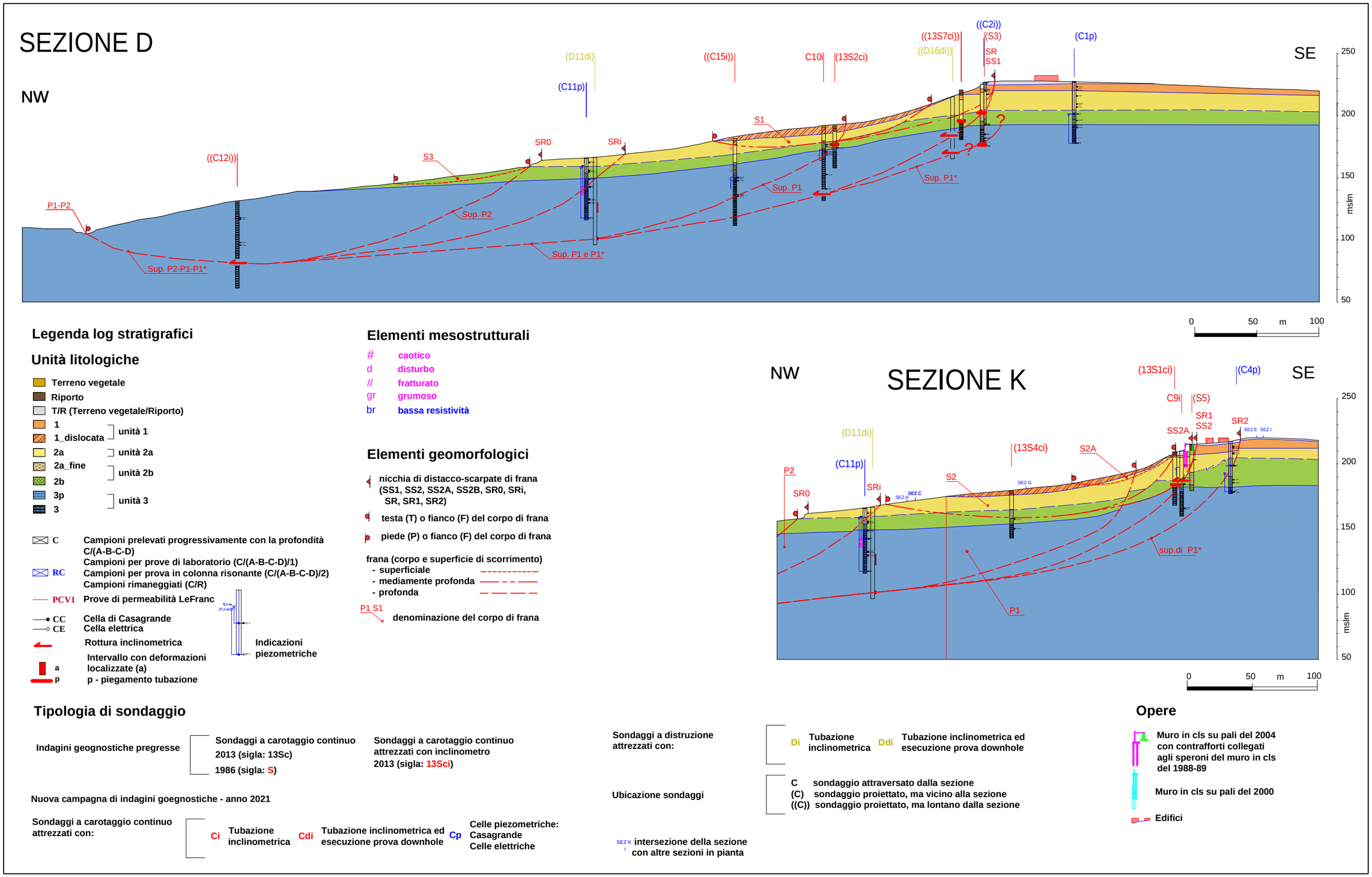


Figura 1.64: Sezioni litostratigrafico-geomorfologiche D e K (ubicazione in Figura 1.62).

1.5 Meccanismo di frana

Come discusso nella I Relazione di II Fase (§5.4 e §6.5), il processo franoso profondo nel versante è molto antico, potendosi ritenere che la sua prima attivazione sia avvenuta nel Pleistocene medio-superiore o all'inizio del Pleistocene superiore (dopo MIS 9, §5.1 della I Relazione di II Fase; 300.000-110.000 anni fa), dal momento in cui l'erosione fluviale ad opera del fiume Bivento ha comportato la genesi della valle ad ovest del promontorio di Chieuti. A partire dal primo evento franoso, il processo deformativo ha coinvolto porzioni più interne del versante fino ad interessare l'abitato, coinvolto sin dai primi anni del 1800 (§0).

La morfologia dei corpi di frana in profondità delineata nelle Figure 1.63 e 1.64 definisce un meccanismo di frana che ricade, da un punto di vista geomorfologico, nella classe degli scivolamenti composti delimitati da bande di taglio, traslative a valle e molto pendenti e/o subverticali a monte, il che comporta nella zona di monte spostamenti con elevata componente verticale e componente orizzontale molto inferiore (come indicato dal monitoraggio geomatico; §1.1), e nella zona di valle spostamenti con componente verticale molto meno significativa e comparabile con quella orizzontale (§1.1).

I recenti monitoraggi evidenziano come l'intero processo franoso sia oggi da molto lento ad estremamente lento (velocità di spostamento che variano da qualche cm/anno a meno di 16 mm/anno; Cruden & Varnes, 1996). Il processo gravitativo di Chieuti rientra quindi nella classe delle frane "molto lente profonde" (Cruden & Varnes, 1996; Grimaldi, 2008; Glastonbury & Fell, 2008), che possono riscontrarsi attive in più tipi di geomateriali, roccia e terreno. La Figura 1.65 riporta due schemi morfologici possibili per questi cinematismi di frana (Glastonbury & Fell, 2008). Si riconosce come questi schematismi presentano degli elementi comuni al cinematismo ricostruito nel versante occidentale di Chieuti (Figure 1.63 e 1.64), ad esempio la forte pendenza della banda di taglio in scarpata e la sua blanda pendenza a valle, ed anche lo spostamento sub-verticale delle masse in scarpata con solo blanda rotazione delle masse.

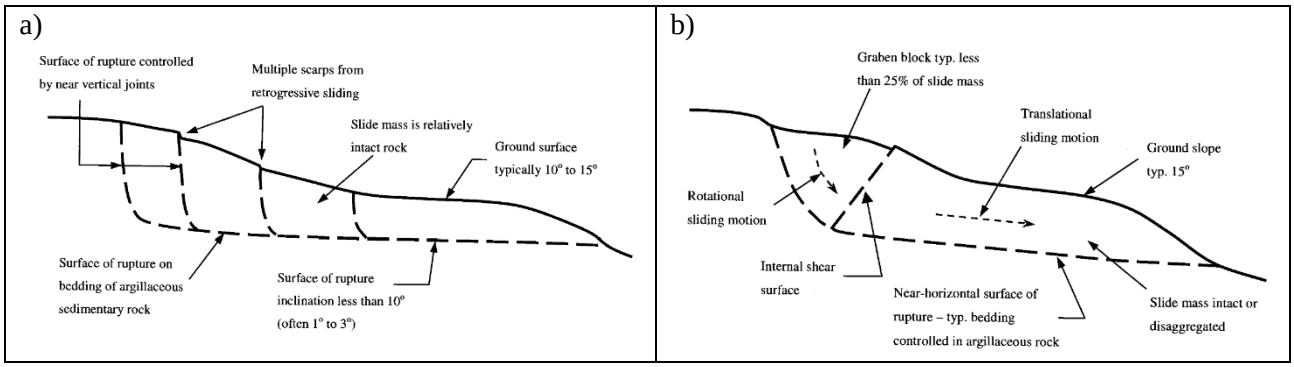


Figura 1.65: Schemi morfologici degli scorrimenti traslativi in roccia (a) e degli scorrimenti composti con piani di taglio interni (b; Glastonbury e Fell, 2008).

2 AVANZAMENTO NELL'INTERPRETAZIONE DELLE RESISTENZE DEI TERRENI NEL PENDIO

Nella I Relazione di II Fase, l'integrazione nelle sezioni litostratigrafiche dei profili geotecnici che mostrano le principali proprietà dei campioni indisturbati prelevati lungo i sondaggi, ha consentito di individuare e caratterizzare le unità geotecniche a partire dalle unità litostratigrafiche. Nella I Relazione di II Fase si è, dunque, definito il modello geotecnico del versante oggetto di studio, a partire dal quale è stato possibile studiare ed interpretare le fenomenologie franose e le loro evoluzioni nello spazio e nel tempo.

Ripercorrendo quanto già descritto nel Capitolo 7 della suddetta relazione, il presente Capitolo ha l'obiettivo prioritario di richiamare sinteticamente le proprietà geotecniche salienti di ciascuna unità, con particolare attenzione a quelle di caratterizzazione meccanica, poiché da queste scaturiscano i dati di input delle analisi numeriche che saranno illustrate nei successivi capitoli, o, alternativamente, perché queste siano di confronto con i risultati di tali analisi, come per il caso delle resistenze operative desunte da analisi a ritroso dell'equilibrio limite, discusse nel capitolo 4. Nel seguito saranno in particolare richiamati, per ciascuna unità: i) con riferimento alla resistenza al taglio, i valori dei parametri di resistenza di picco, di post-picco e di resistenza ultima, desunti attraverso prove triassiali (drenate e non drenate) e prove di taglio diretto, condotte presso Geo S.r.l.; ii) i valori dei parametri di resistenza residua, desunti da prove di taglio anulare con apparecchio di Bromhead, condotte presso il Laboratorio Geotecnico 'G. Melidoro' del Politecnico di Bari.

Si ritiene importante rimarcare che nel seguito i risultati della sperimentazione condotta nel corso della più recente campagna geognostica sono integrati con quelli delle sperimentazioni condotte precedentemente, nelle campagne di indagine del 1986 e 2013.

Di seguito si riporta il programma sperimentale eseguito da Geo Srl (Tabella 2.1).

Tabella 2.1 Programma sperimentale eseguito da Geo Srl.

SONDAGGIO	CAMPIONE	Profondità del campione (m da p.c.)	VA	APERTURA CAMPIONE	PROVE DI RICONOSCIMENTO					PROVA EDOMETRICA	PROVA DI TAGLIO DIRETTO	PROVA TRX CIU/CID	PROVA DI PERMEABILITÀ DIRETTA: carico variabile (cv) o costante (cc)
					wnat	γnat	Gs	wL, wP	Analisi granulometrica	σ'v,MAX (kPa)			
C1p	A	4.20-4.7	780	09/03/2021	X	X	X	X	X	15000	-	CIU	cv
	B	11.6-12.0	780	25/01/2021	X	X	X	X	X	-	PICCO	-	cc
	C	20.5-21.0	780	23/03/2021	X	X	X	X	X	-	-	CIU	cv
	D	35.0-35.4	780	15/03/2021	X	X	X	X	X	5000	-	CIU	-
C2i	A	4.7-5.0	778	11/01/2021	X	X	X	X	X	5000	-	-	cv
	B	32.5-33.0	778	08/01/2021	X	X	X	X	X	5000	-	CIU	-
	C	40.0-40.5	778	02/02/2021	X	X	X	X	X	5000	-	CIU	-
C3di	A	6.5-7.0	780	20/04/2021	X	X	X	X	X	-	RESIDUO	-	cv
	B	9.0-9.5	780	17/03/2021	X	X	X	X	X	-	PICCO	-	cv
	C	11.5-12.0	780	11/02/2021	X	X	X	X	X	-	PICCO	-	cv
	D	26.0-26.5	780	12/04/2021	X	X	X	X	X	15000	PICCO	(CID)*	-
	E1	35.0-35.5	780	20/04/2021	X	X	X	X	X	15000	-	CIU	-
C4p	A1	8.6-9.0	778	04/01/2021	X	X	X	X	X	5000	PICCO	-	-
	B	29.0-29.5	778	15/02/2021	X	X	X	X	X	5000	-	CID	-
C5i	1	8.00-8.50	774	04/01/2021	X	X	X	X	X	-	PICCO	-	cv
	2A	16-16.4	774	11/01/2021	X	X	X	X	X	-	-	CIU	cv
	3	31-31.5	774	08/01/2021	X	X	X	X	X	5000	-	CIU	-
C6i	A1	5.0-5.5	777	04/01/2021	X	X	X	X	X	-	-	-	cv
	B	15.0-15.6	777	26/04/2021	X	X	X	X	X	-	PICCO (2 provini)	CID (1 provino)	cv
	C	25.5-25.9	777	04/02/2021	X	X	X	X	X	5000	-	CIU	-
	D	38.0-38.5	777	01/03/2021	X	X	X	X	X	5000	-	CIU	-
C7p	A	8.6-9.0	785	18/03/2021	X	X	X	X	X	15000	-	-	-
	B1	32.0-32.5	785	18/03/2021	X	X	X	X	X	-	PICCO	-	-
C8p	A	9.0-9.5	782	01/03/2021	X	X	X	X	X	-	PICCO	-	cv
	B	24.0-24.5	785	02/03/2021	X	X	X	X	X	5000	RESIDUO	-	-

C9i	A	10.5-11.0	778	05/03/2021	X	X	X	X	X	-	PICCO	-	cv
	B1	20.5-21.0	778	04/02/2021	X	X	X	X	X	-	PICCO	-	cv+cc
	C	44.0-44.5	778	08/03/2021	X	X	X	X	X	5000	-	CIU	-
C10i	A1	15.0-15.5	782	02/02/2021	X	X	X	X	X	-	PICCO	-	-
	B1	20.5-21.0	782	25/01/2021	X	X	X	X	X	5000	-	-	-
	C	50.5-51.0	782	06/04/2021	X	X	X	X	X	15000	-	CIU	-
C11p	A	10.0-10.5	789	30/03/2021	X	X	X	X	X	-	-	-	cv
	B	17.0-17.5	790	22/03/2021	X	X	X	X	X	5000	RESIDUO	-	-
	C	33.0-33.5	790	22/03/2021	X	X	X	X	X	5000	-	CIU	-
C12i	A	13.0-13.5	785	23/04/2021	X	X	X	X	X	-	PICCO	-	-
	B	33.0-33.5	785	09/04/2021	X	X	X	X	X	5000	-	CIU	-
C13i	A	15.0-15.5	785	12/04/2021	X	X	X	X	X	-	-	-	-
	B	30.5-31.0	785	12/04/2021	X	X	X	X	X	-	-	-	-
	C	42.5-43.0	785	12/04/2021	X	X	X	X	X	-	-	-	-
	D1	50.0-50.5	785	12/03/2021	X	X	X	X	X	5000	-	-	-
C14p	A	4.0-4.4	778	16/02/2021	X	X	X	X	X	-	PICCO	-	cv
	B	21.0-21.5	778	28/01/2021	X	X	X	X	X	5000	PICCO	-	-
C15i	A1	31.0-31.5	789	01/04/2021	X	X	X	X	X	5000	RESIDUO	-	-
	B1	45.0-45.5	789	29/03/2021	X	X	X	X	X	5000	-	CIU	-

*prova non eseguita

2.1 Riepilogo delle resistenze a taglio: di picco, post-picco ed ultima

La resistenza a taglio dei provini di Chieuti è stata indagata attraverso prove di taglio diretto, monotoniche (1 ciclo) e cicliche (5 cicli, per la resistenza post-picco), prove triassiali, drenate e non drenate, per l'individuazione della resistenza di picco, di post-picco (in fase di incrudimento negativo) e della resistenza ultima, e prove di taglio anulare Bromhead, per determinare il valore dell'angolo di resistenza residua, queste ultime condotte presso il Laboratorio Geotecnico del Politecnico di Bari.

2.1.1 Unità 1

Per i terreni costituenti l'Unità 1, nella campagna di prove di laboratorio eseguite nel 2021 si sono sottoposti a prove di taglio 2 campioni, C1p-A (TRX-CIU) e C14p-A (TD), potendone riconoscere una natura prevalentemente sabbioso-limosa; il campione 13S6-C1 (TD) era stato testato in precedenza. In generale l'unità 1 è risultata anche inclusiva di una componente ghiaiosa in matrice sabbioso-limosa o sabbioso-argillosa (Capitolo 7 della I Relazione di II Fase).

Il comportamento esibito nelle prove in compressione edometrica è stato variabile in connessione con l'eterogeneità della granulometria e degli indici dei vuoti iniziali dei campioni.

Nelle prove di taglio eseguite, i provini hanno esibito un comportamento tendenzialmente rammollente e dilatante (comportamento dry).

Gli inviluppi di resistenza in condizioni di picco, definibili solo per i campioni 13S6-C1 (c'=8.5kPa, ϕ'=26.6°) e C14p-A (c'=0kPa, ϕ'=33.9°), sono riportati in Figura 2.1 e Tabella 2.2. Per il campione C1p-A, infatti, l'osservazione dei percorsi di sforzo ha reso difficile individuare un inviluppo di resistenza relativo alle condizioni di picco.

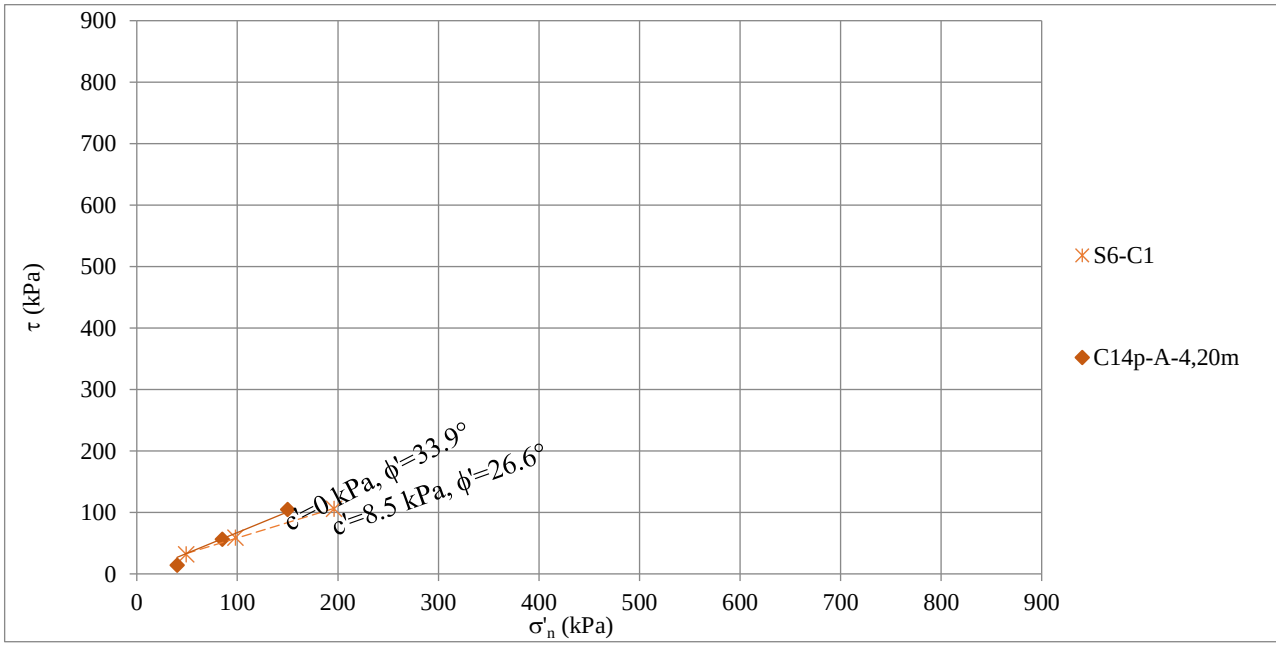


Figura 2.1 Inviluppi di resistenza individuati per i campioni 13S6-C1 e C14p-A afferenti all'unità 1.

Tabella 2.2 Inviluppi di resistenza di picco per i campioni afferenti all'unità 1.

Sigla campione	**PICCO**	
	c'	**ϕ'**
	kPa	°
C1p-A	-	-
C14p-A	0,0	33,9
S6-C1	8,5	26,6

Come ampiamente discusso nella I Relazione di II fase, per tutti i provini testati, sia in prova triassiale che in prova di taglio diretto, i valori dei rapporti di sforzo, q/p' o τ/σ', in corrispondenza del picco e in corrispondenza della massima deformazione ε_a o del massimo scorrimento δ, hanno permesso di calcolare per ciascuno dei 3 provini di uno stesso campione i valori di ϕ'_P e ϕ'_{ULT}. Il valor medio dei ϕ'_P e ϕ'_{ULT} dei 3 provini rappresenta il valore medio, $\phi'_{P,m}$ e $\phi'_{ULT,m}$, attribuibile al campione. Tali valori con riferimento ai campioni dell'unità 1 sono riportati in Tabella 2.3.

Inoltre, in Figura 2.2-a,b, tali valori di resistenza sono mostrati in relazione ai valori di CF e SF presenti nei campioni corrispondenti.

Tabella 2.3 Parametri di resistenza di picco e ultimi per i campioni afferenti all'unità 1.

Sigla campione	**z slm**	**z da pc**	**Unità**	**Prova**	**CF**	**SF**	**n.**	**pressione di consolidazione**	**ϕ'_P**	**$\phi'_{P,m}$**	**ϕ'_{ULT}**	**$\phi'_{ULT,m}$**
	m				%	%		kPa	°	°	°	°
C1p-A	223,29	4,45	1	CIU	17,25	6,81	1	50	nd	29,9	nd	13,7
							2	100	36,8		17,8	
							3	180	22,9		9,6	
C14p-A	203,91	4,20	1	TD	28,73	10,01	1	40	19,4	29,3	13,4	23,2
							2	85	33,6		22,3	
							3	150	34,9		33,8	
S6-C1	203,99	5,25	1	TD	21,42	41,26	1	49	33,1	30,9	31,5	29,9
							2	98	31,0		30,2	
							3	196	28,4		28,2	
MEDIA										**30,0**		**22,3**

I valori della resistenza di picco per i campioni sono molto prossimi ($29.2° < \phi'_{P,m} < 30.9°$) e non risentono né di CF, né di SF; mentre i valori di post-rottura ricadono in un intervallo più ampio ($13.7° < \phi'_{ULT,m} < 29.9°$), con valore massimo corrispondente a SF massima. In tabella sono inoltre riportati il valore medio di $\phi'_{P,m}$ =30° e di $\phi'_{ULT,m}$ =22.3° per l'intera Unità 1.

Per questa Unità si è pertanto individuato un angolo di attrito complessivamente compreso tra 13.74° (ultimo) $< \phi'_{U1} <$ 30.87° (picco).

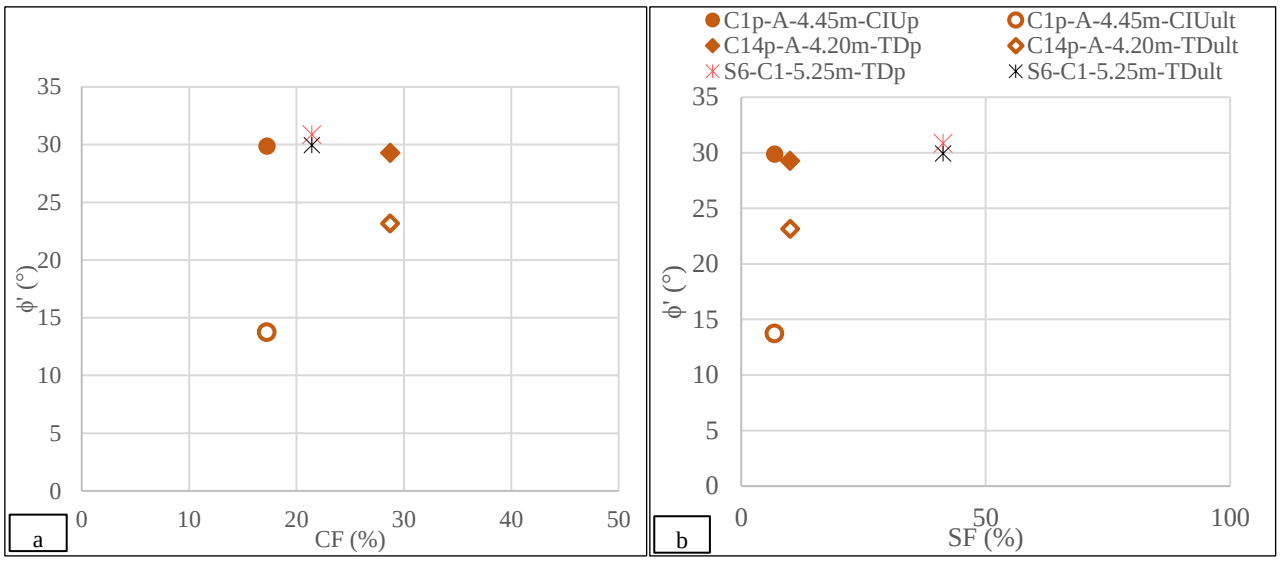


Figura 2.2 Andamento dei valori di □' medio di picco (simbolo pieno) e ultimo (simbolo vuoto) in relazione con la CF e la SF per i campioni afferenti all'unità 1 (a, b).

2.1.2 Sub-unità 2a

La Sub-unità 2a si caratterizza per la presenza di terreni sabbiosi con granulometria da media a fine. Si tratta di sabbie male assortite o pressoché uniformi, che presentano locali livelli a componente limosa o argillosa dominante, come intercettato da alcuni campioni (C9i-A e 13S1-C1).

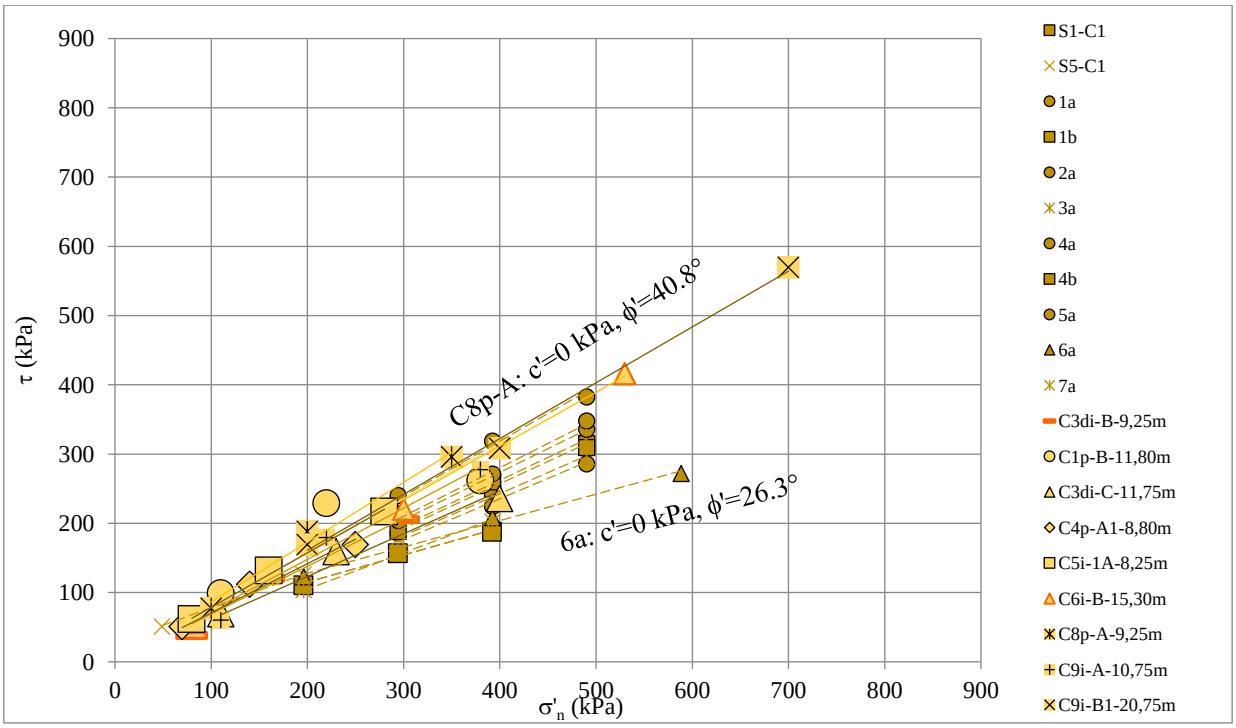


Figura 2.3 Inviluppi di resistenza di picco individuati per i campioni di taglio diretto afferenti alla Sub-unità 2a.

Nelle prove di compressibilità edometrica le sabbie di questa sub-unità geotecnica hanno esibito un comportamento molto rigido sia nel ramo di carico che nel ramo di scarico, come da materiali sabbiosi.

Analizzando i risultati delle prove di taglio diretto al picco, si è potuto individuare un fuso compreso tra le

rette c'=0kPa, ϕ'=26.3° e c'=0kPa, ϕ'=40.8° (Figura 2.3 e Tabella 2.4 Inviluppi di resistenza di picco e di post-rottura per i campioni afferenti alla Sub-unità 2a (campagne 2013 e 2021).Tabella 2.4).

Le prove di resistenza al taglio condotte sui campioni dell'Unità 2a sono prevalentemente prove di taglio diretto, fatta eccezione per una prova triassiale CID (campione C6i-B); queste hanno consentito di attestare che queste sabbie presentano prevalentemente comportamento incrudente e contraente (wet), potendo quindi identificarle come sabbie poco-mediamente addensate, con indice dei vuoti in tutti i casi superiore a 0.5.

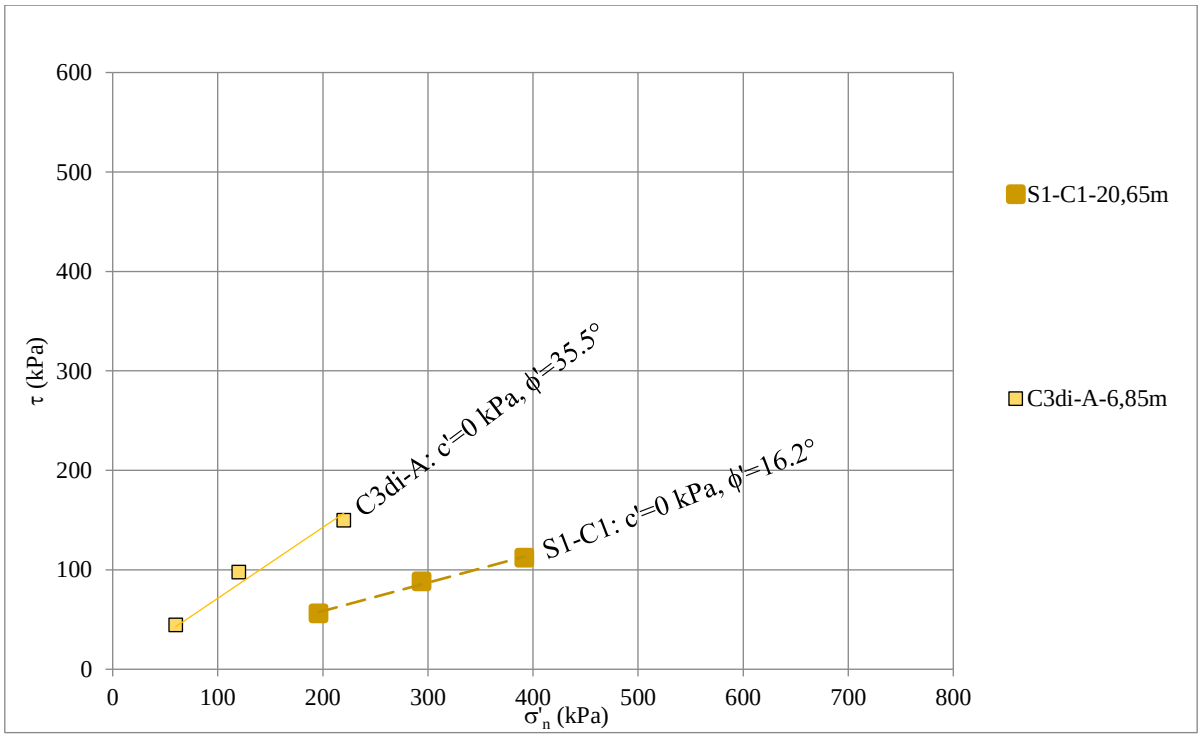


Figura 2.4 Inviluppi di resistenza post-rottura individuati per i campioni di taglio diretto afferenti alla Sub-unità 2a.

La prova di taglio ciclico condotta sul campione C3di-A (Figura 2.4 e Tabella 2.4) ha confermato che la resistenza post-rottura (dopo 5 cicli) è di poco differente da quella ultima, che è evidentemente rappresentativa della condizione di stato critico. La prova di taglio ciclico sul campione S1-C1, appartenente ad un livello argilloso, restituisce invece un angolo d'attrito post rottura significativamente più basso tipico di materiali argillosi.

In Tabella 2.5, sono inoltre riportati i valori di ϕ'_{PR} e $\phi'_{PR,m}$ per i campioni menzionati. Con riferimento ai valori di ϕ'_{P}, ϕ'_{ULT}, $\phi'_{P,m}$ e $\phi'_{ULT,m}$, si osserva che gli intervalli individuati dai valori di picco e ultimi sono pressocchè coincidenti, come atteso per sabbie wet poco addensate.

L'angolo di attrito dell'unità 2a è complessivamente compreso tra $26.3° < \phi'_{sU2a} < 41°$ ed il valore medio attribuibile è di 34-35°.

Tabella 2.4 Inviluppi di resistenza di picco e di post-rottura per i campioni afferenti alla Sub-unità 2a (campagne 2013 e 2021).

Sigla campione	**PICCO**		**POST-ROTTURA**
	c'	**ϕ'**	**ϕ'**
	kPa	°	°
C6i-B	0	33,51	-
C6i-B	0	37,9	-
C1p-B	0	38,1	-
C3di-B	0	34,6	-
C3di-C	0	31,7	-
C4p-A1	0	35,3	-
C5i-1A	0	38,2	-
C8p-A	0	40,8	-
C9i-A	0	36,5	-
C9i-B1	0	38,9	-
C3di-A	0	34,5	35,5
S1-C1	36,5	21,4	16,2
S5-C1	0	34,7	-

Dai dati in Figura 2.5-a,b si evince che, per i campioni della più recente campagna geognostica e di quella del 2013, l'angolo d'attrito tende a diminuire all'aumentare di CF e al ridursi di SF, registrando per campioni afferenti ad intercalazioni argillose, come il 13S1-C1, un valore minimo; per i campioni del 1986, i valori degli angoli di resistenza risultano mediamente più bassi, anche a parità di SF e per CF minori.

Tabella 2.5 Parametri di resistenza di picco e ultimi per i campioni afferenti alla Sub-Unità 2a (campagne 2013 e 2021).

Sigla campione	**z slm**	**z da pc**	**Prova**	**CF**	**SF**	**n.**	**pressione di consolidazione**	**ϕ'_P**	**$\phi'_{P,m}$**	**ϕ'_{ULT}**	**$\phi'_{ULT,m}$**	**ϕ'_{PR}**	**$\phi'_{PR,m}$**
	m			%	%		kPa	°	°	°	°		
C6i-B	199,80	15,30	CID	5,79	71,42	1	-	-	33,5	-	31,9	-	-
						2	300	33,51		31,88		-	
						3	-	-		-		-	
C6i-B	199,80	15,30	TD	5,79	71,42	1	-	-	37,2	-	35,8	-	-
						2	300	36,28		35,39		-	
						3	530	38,16		36,25		-	
C1p-B	215,94	11,80	TD	3,61	84,66	1	110	42,10	41,0	37,14	39,0	-	-
						2	220	46,19		46,19		-	
						3	380	34,58		33,63		-	
C3di-B	214,99	9,25	TD	5,86	82,87	1	80	25,50	32,4	24,91	32,1	-	-
						2	160	37,14		37,14		-	
						3	300	34,43		34,30		-	
C3di-C	212,49	11,75	TD	11,72	56,45	1	110	32,30	32,5	31,55	31,7	-	-
						2	230	34,72		33,51		-	
						3	400	30,54		30,18		-	
C4p-A1	208,33	8,80	TD	0,50	95,79	1	70	36,09	36,3	35,28	35,5	-	-
						2	140	38,73		37,63		-	
						3	250	34,11		33,73		-	
C5i-1A	200,95	8,25	TD	2,17	81,07	1	80	37,66	38,3	37,66	37,3	-	-
						2	160	39,57		37,01		-	

						3	280	37,79		37,25		-	
C8p-A	206,25	9,25	TD	6,09	72,78	1	100	37,71	40,4	34,53	37,3	-	-
						2	200	43,31		37,86		-	
						3	350	40,22		39,47		-	
C9i-A	199,18	10,75	TD	4,15	38,76	1	110	28,70	34,7	24,74	33,3	-	-
						2	220	39,25		39,25		-	
						3	380	36,14		35,76		-	
C9i-B1	189,18	20,75	TD	6,37	65,73	1	200	40,31	39,0	35,39	36,5	-	-
						2	400	37,65		37,30		-	
						3	700	39,14		36,74		-	
C3di-A	217,49	6,85	TD (5 cicli)	8,04	51,03	1	60	36,66	35,0	36,66	35,0	36,66	36,7
						2	120	34,03		34,03		39,15	
						3	220	34,42		34,42		34,25	
S1-C1-20.65m	188,44	20,65	TD (5 cicli)	49,79	5,43	1	196	29,52	27,7	29,52	27,6	15,95	16,2
						2	294	28,10		27,80		16,66	
						3	392	25,62		25,38		15,95	
S5-C1-3m	173,00	3,00	TD	13,42	39,92	1	49	46,15	39,3	46,15	39,2	-	-
						2	98	38,87		38,87		-	
						3	196	32,74		32,53		-	
MEDIA									**35,9**		**31,9**		**26,5**

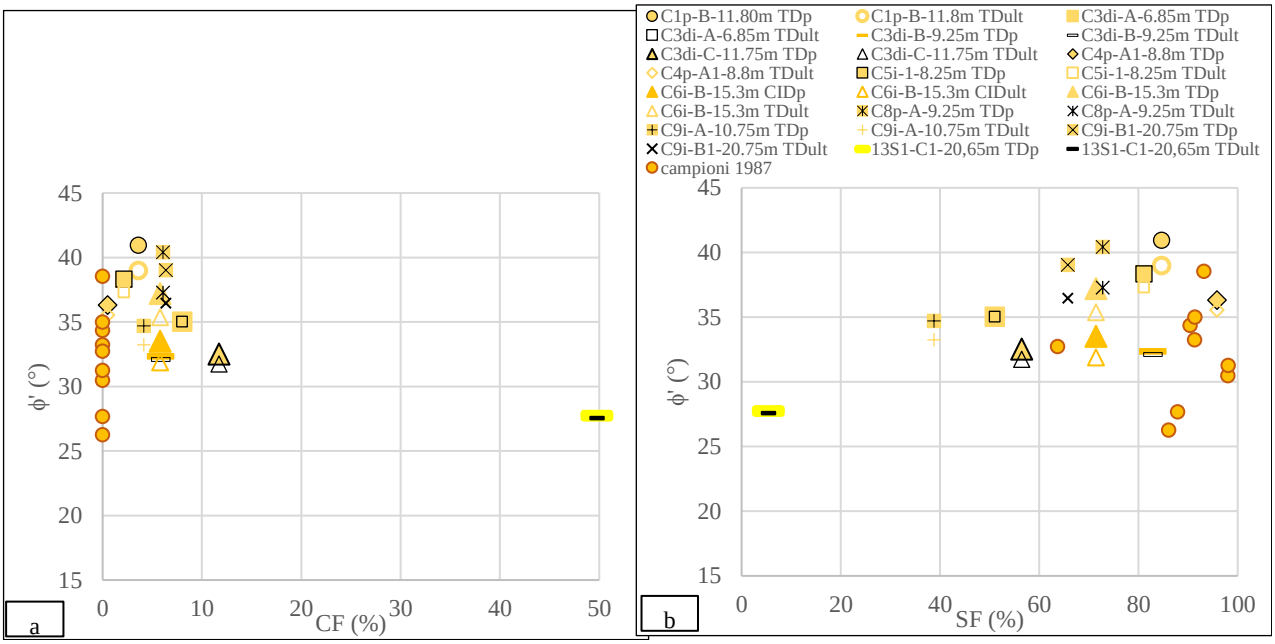


Figura 2.5 Andamento dei valori di □' medio di picco (simbolo pieno) e ultimo (simbolo vuoto) in relazione con la CF e la SF per i campioni afferenti alla Sub-unità 2a (a,b).

2.1.3 Sub-unità 2b

Approfondendosi le sabbie della Sub-unità 2a lasciano gradualmente spazio ai limi della Sub-unità 2b con percentuali variabili di sabbia e secondariamente di argilla. Trattandosi di uno strato che attesta il passaggio progressivo alla sottostante Unità 3, più squisitamente argillosa, le composizioni granulometriche dei campioni ubicati nel membro superiore $2b_s$, come il C8p-B e il C11p-A, presentano contenuti di sabbia più elevati per lasciar spazio più in profondità a terreni con frazione limo-argillosa dominante.
Le curve di compressione relative a questa sub-unità, pur raggiungendo la tensione di snervamento, non manifestano un repentino crollo di rigidezza in corrispondenza della stessa, anzi esibiscono curvature ampie in corrispondenza del ginocchio della curva, tipicamente riconoscibili nei materiali a matrice limosa dominante.
Le prove di taglio condotte sui provini afferenti a questa unità hanno messo in luce un comportamento tendenzialmente più incrudente e contraente, rispetto ad altri che hanno esibito un comportamento tipicamente dry, questo in funzione di un più alto OCR.
Le resistenze esibite dai provini testati con prove triassiali appaiono confrontabili, poiché il rapporto di sforzo al picco per tutte le terne di provini è compreso tra 1.1 e 1.4. Tale osservazione è confermata dall'analisi dei percorsi di sforzo e dei corrispondenti inviluppi di resistenza di picco (Figura 2.6; inviluppi di resistenza di picco compresi tra c'=0kPa, ϕ'=28.97° del C1p-C e c'=0kPa, ϕ'=31.3° del C6i-c) e sintetizzati in Tabella 2.6 e dettagliati per singolo provino in Tabella 2.7.
Il campione C5i-2 pur manifestando comportamento dry nei primi due provini e wet nel terzo, si presenta mediamente più debole sia in condizioni di picco che ultime.

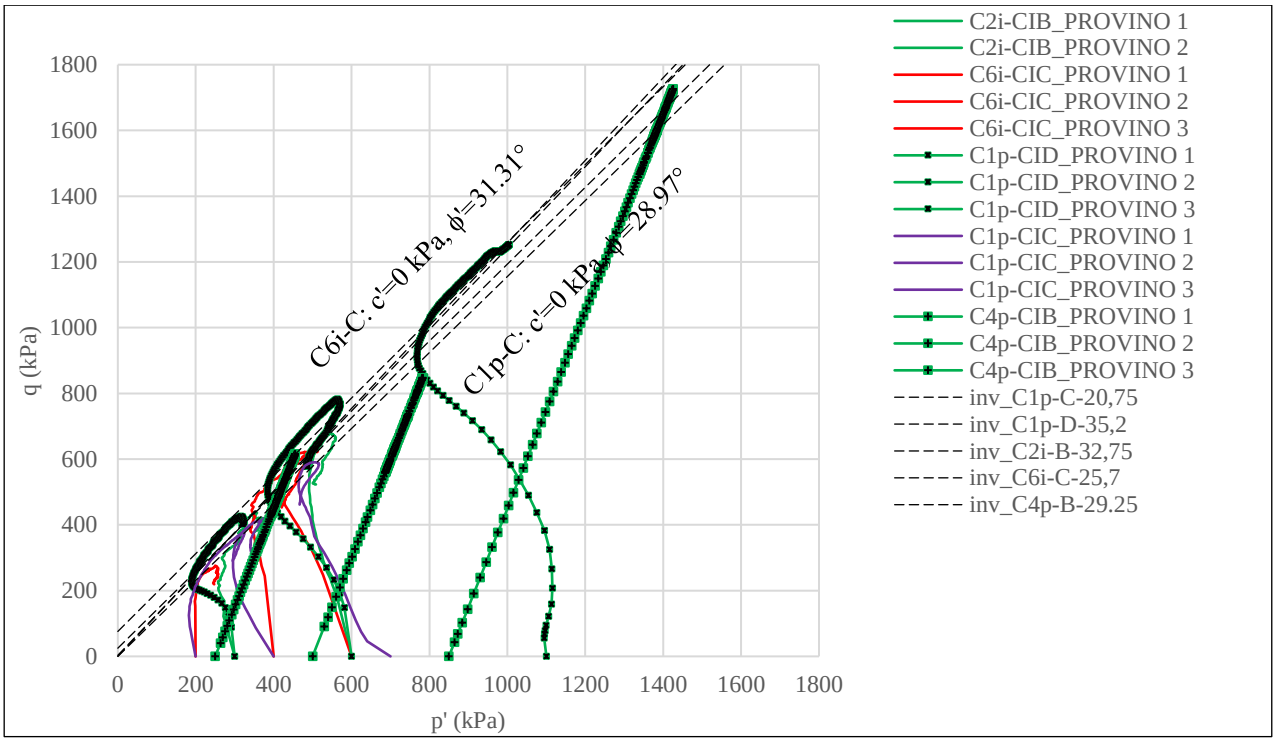


Figura 2.6 Percorsi di sforzo e inviluppi di resistenza esibiti nelle prove triassiali eseguite sui campioni afferenti alla Sub-unità 2b.

Tabella 2.6 Inviluppi di resistenza di picco e di post-rottura per i campioni afferenti alla Sub-unità 2b.

Sigla campione	**PICCO**		**POST-ROTTURA**
	c'	**ϕ'**	**ϕ'**
	kPa	°	°
C1p-C	0,00	28,97	-
C1p-D	36,42	29,62	-
C2i-B	1,62	30,88	-
C5i-2	62,69	16,72	-
C6i-C	0,00	31,31	-
C4p-B	11,97	29,27	-
C8p-B	0,00	41,27	33,78
C10i-A1	25,58	26,14	-
C3di-D	2,14	18,69	-
S1-C2	25,00	20,15	16,3
S2-C1	23,00	23,65	18,6
S3-C1	17,50	23,94	18,7
S5-C2	15,00	22,46	16,4

Tabella 2.7 Parametri di resistenza di picco e ultimi per i campioni afferenti alla Sub-unità 2b (campagne 2013 e 2021).

Sigla campione	**z slm**	**z da pc**	**Prova**	**CF**	**SF**	**n.**	**pressione di consolidazione**	**ϕ'$_{P}$**	**ϕ'$_{P,m}$**	**ϕ'$_{ULT}$**	**ϕ'$_{ULT,m}$**	**ϕ'$_{PR}$**	**ϕ'$_{PR,m}$**
	m			%	%		kPa	°	°	°	°		
C1p-C	206,99	20,75	CIU	21,54	8,67	1	200	30,65	30,1	25,02	24,7	-	-
						2	400	29,56		23,82		-	
						3	700	30,14		25,11		-	
C1p-D	192,54	35,20	CIU	10,26	45,69	1	300	34,93	34,2	31,21	30,7	-	-
						2	600	35,47		29,84		-	
						3	1100	32,20		31,09		-	
C2i-B	192,57	32,75	CIU	16,19	43,80	1	300	31,55	31.5	27,14	26,6	-	-
						2	600	31,50		26,05		-	
						3	800	-		-		-	
C5i-2	193,00	16,20	CIU	17,28	39,71	1	150	30,12	28,6	23,43	19,7	-	-
						2	300	32,78		22,64		-	
						3	530	22,99		12,98		-	
C6i-C	189,40	25,70	CIU	16,65	43,10	1	200	28,87	32,1	22,71	26,7	-	-
						2	400	33,97		30,38		-	
						3	600	33,50		27,14		-	
C4p-B	187,88	29,25	CID	10,68	64,00	1	250	33,50	30,3	27,54	25,4	-	-
						2	500	27,30		21,01		-	
						3	850	30,25		27,60		-	
C8p-B	191,25	24,25	TD (5 cicli)	8,00	60,94	1	220	31,72	37,7	31,72	37,7	30,06	33,1
						2	450	38,44		38,44		36,11	
						3	780	42,81		42,81		33,27	
C10i-A1	176,58	15,25	TD	16,00	36,72	1	110	31,82	31,5	27,69	27,7	-	-
						2	230	34,44		28,96		-	
						3	400	28,13		26,49		-	
C3di-D	197,99	26,25	TD	21,56	35,15	1	250	22,70	19,3	19,30	16,3	-	-
						2	500	15,78		12,66		-	
						3	870	19,52		16,84		-	
S1-C2	186,34	22,75	TD (5 cicli)	24,05	25,70	1	196	25,86	24,6	24,90	24,1	16,21529	16,3
						2	294	24,98		24,66		16,84217	
						3	392	23,07		22,70		15,9454	
S2-C1	174,40	17,55	TD (5 cicli)	20,86	27,13	1	196	28,63	31,2	28,63	31,1	18,34721	18,7
						2	294	38,87		38,70		19,30741	
						3	392	26,21		26,10		18,34721	
S3-C1	198,82	22,80	TD (5 cicli)	11,98	39,19	1	196	27,49	26,9	27,49	26,8	18,34721	18,7
						2	294	27,49		27,34		19,30741	
						3	392	25,74		25,62		18,47879	
S5-C2	166,45	9,55	TD (5 cicli)	16,54	34,53	1	96	28,86	26,8	27,95	26,2	16,48445	16,5
						2	196	26,80		26,33		17,02053	
						3	294	24,66		24,34		16,12541	
MEDIA									**29,6**		**26,4**		**20,7**

I campioni sottoposti a prove di taglio diretto si presentano tutti per lo più incrudenti e volumetricamente contraenti, dunque wet. Fatta eccezione per i campioni C8p-B e C10i-A1, che esibiscono rapporti di sforzo, dunque resistenze, abbastanza elevati, i restanti campioni, C3di-D e tutti i campioni del 2013 (13S1-C2, 13S2-C1, 13S3-C1 e 13S5-C2), manifestano resistenze significativamente più basse, come confermano ancora più chiaramente gli inviluppi di resistenza mostrati in Figura 2.7. I risultati delle 5 prove di taglio diretto ciclico eseguite sui campioni del 2013 e sul C8p-B rivelano che per i campioni della campagna 2013, 16.3°< $\phi'_{PR,m}$ <18.7°, mentre il C8p-B ha un $\phi'_{PR,m}$ = 33.1° essendo caratterizzato da una dominante componente sabbiosa. (Figura 2.8 e Tabella 2.7). Tutti presentano per lo più un comportamento incrudente e contraente di tipo wet.

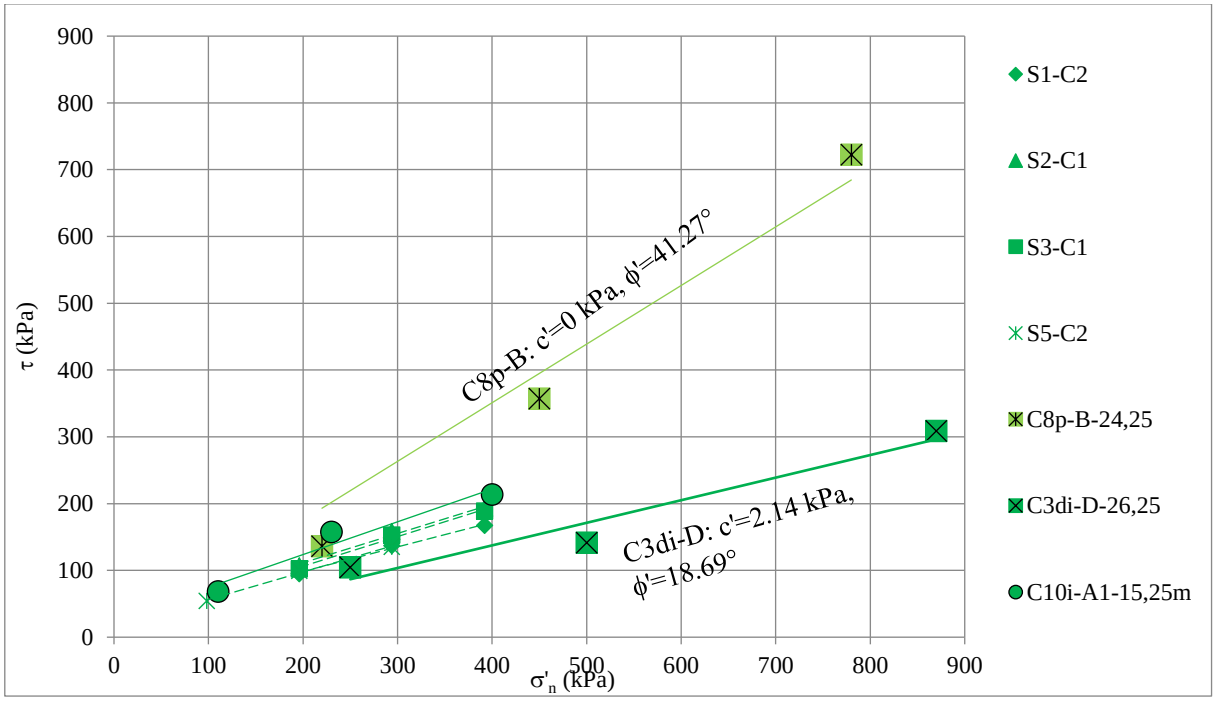


Figura 2.7 Inviluppi di resistenza di picco individuati per i campioni sottoposti a taglio diretto afferenti alla Sub-unità 3b.

Confrontando i ϕ'_P e ϕ'_{ULT} calcolati dai valori di picco e ultimo del rapporto di sforzo (Tabella 2.7), si nota che i campioni più resistenti sono caratterizzati tendenzialmente da valori più elevati di SF: i campioni con resistenza più elevata nella sub-unità, il C8p-B e il C1p-D, presentano frazioni sabbiose tra le più alte. Al contrario, i campioni meno resistenti, come quelli del 2013, tendono ad avere non solo SF più basse, ma anche CF più elevate (le massime in C3di-D e 13S1-C2, tra i più deboli).

Il valore di picco medio per questi materiali è $\phi'_{P,m}$=29.6°, mentre in condizione ultima risulta pari a $\phi'_{ULT,m}$ =26.4°.

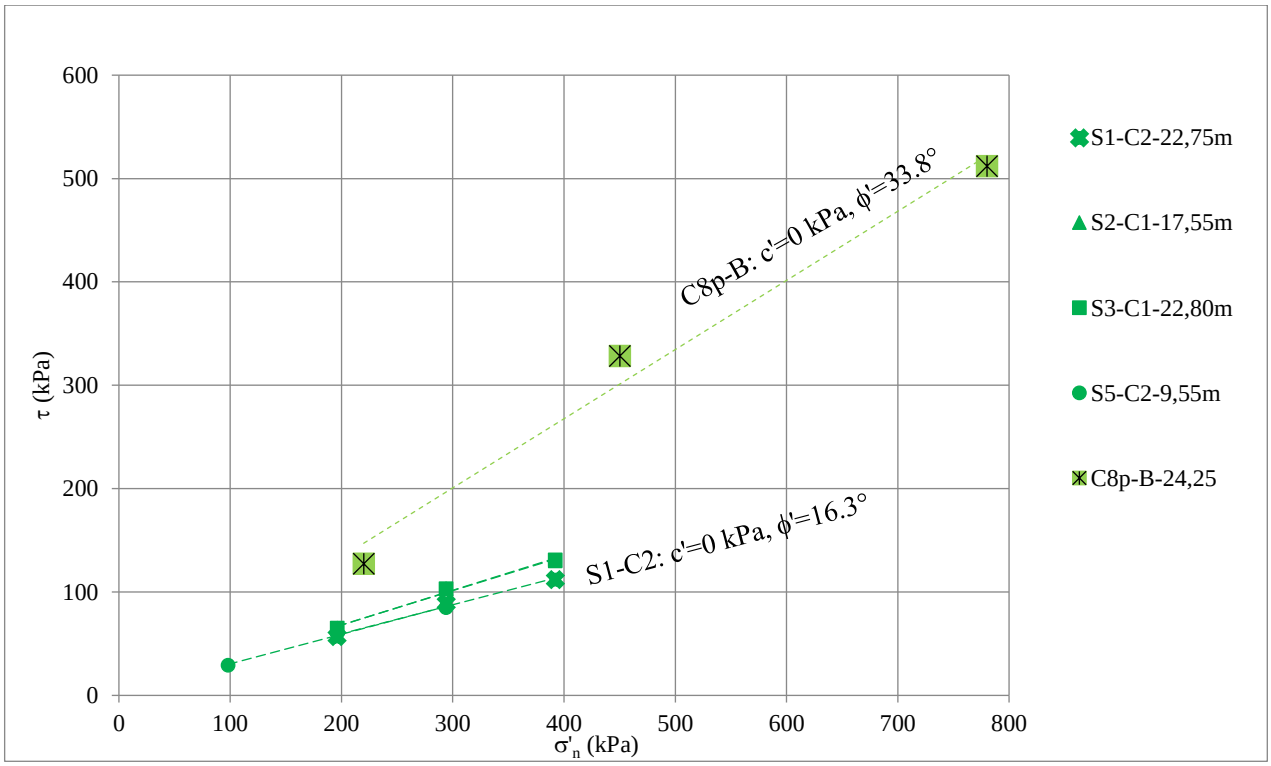


Figura 2.8 Inviluppi di resistenza post-rottura individuati per i campioni di taglio diretto afferenti alla Sub-unità 2b.

I campioni della Sub-unità 2b esibiscono angoli di attrito complessivamente compresi tra 16.3° (ultimo) < ϕ'_{sU2b} < 37.6° (picco), con valori medi sull'unità di circa 30° per il picco e circa 26° per il valore ultimo. Escludendo i campioni estremamente resistenti (C8p-B, minima CF e massima SF) ed estremamente deboli (C3di-A e C5i-2), il comportamento meccanico della Sub-unità 2b è ben rappresentato nell'intervallo 24° (ultimo) < ϕ'_{su2b} < 34° (picco). Anche in questo caso si osserva, complessivamente, la tendenza della resistenza a diminuire per CF più alte e SF più basse (Figura 2.9-a,b).

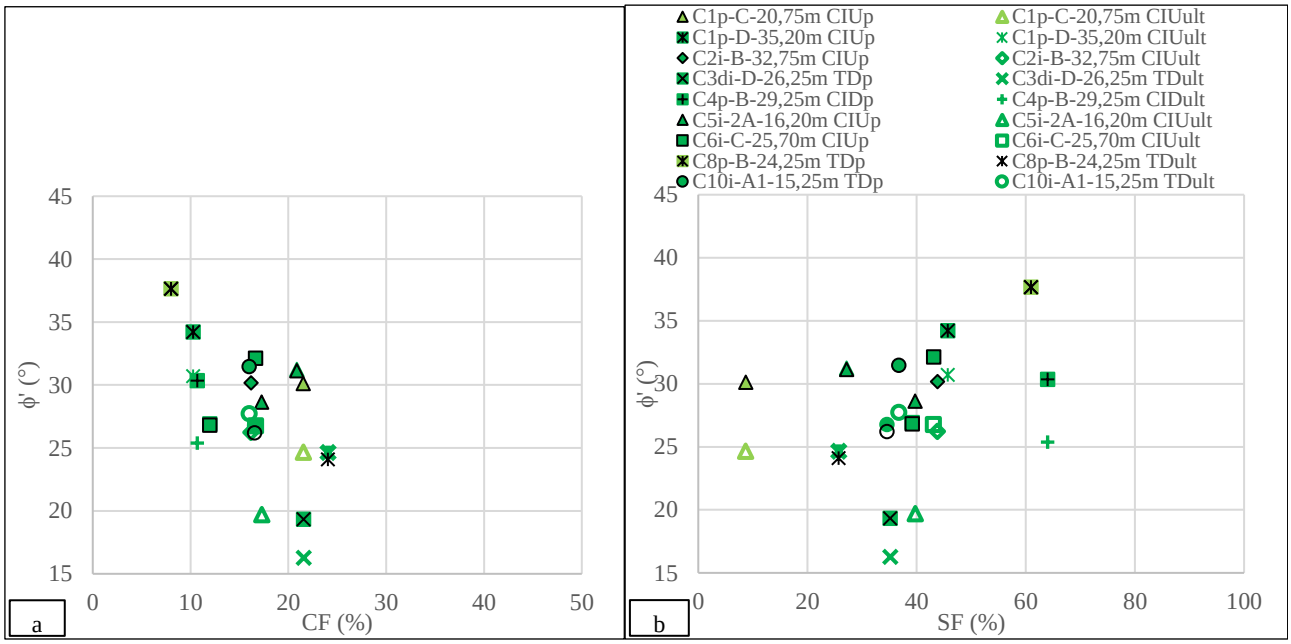


Figura 2.9 Andamento dei valori di ϕ' medio di picco (simbolo pieno) e ultimo (simbolo vuoto) in relazione con la CF e la SF per i campioni afferenti alla Sub-unità 2b (a, b).

2.1.4 Unità 3

Anche l'Unità 3 presenta materiali a forte componente limosa, combinata con frazione argillosa e frazione sabbiosa. Si è individuato un membro di passaggio 3p dalla sovrastante Sub-unità 2b, che presenta una maggiore concentrazione della parte più limosa e sabbiosa; più in profondità invece si rinvengono materiali tipicamente rappresentativi dell'Unità 3, per i quali è dominante la componente argillosa, che supera il 30%, raggiungendo i valori massimi nei campioni più profondi dei sondaggi C12i, C15i e C10i.
I bassi valori di resistenza meccanica riscontrati per i materiali di questa unità valgono per i campioni argillosi più profondi, con più elevato valore di CF e più basso valore dell'indice di consistenza IC, che caratterizzano la zona di piede del versante (C12i), ma altresì l'area più centrale (C10i-C e C15i-B1) e anche di monte (C9i-C).

Nelle prove di compressibilità edometrica, i campioni dell'Unità 3 esibiscono valori di indice di ricompressione che di poco superano 0.10 a pressioni inferiori a quella di snervamento, per poi aumentare fino a valori poco al di sotto di 0.25. Pe quanto attiene il valore di C_s, si attestano valori compresi tra 0.04 e 0.05, che tendenzialmente caratterizzano la maggior parte dei campioni di questa unità, fatta eccezione per quelli a più elevata componente sabbiosa. Inoltre, non si individua per questa unità un'unica NCL in ragione del variare della composizione granulometrica tra i campioni.

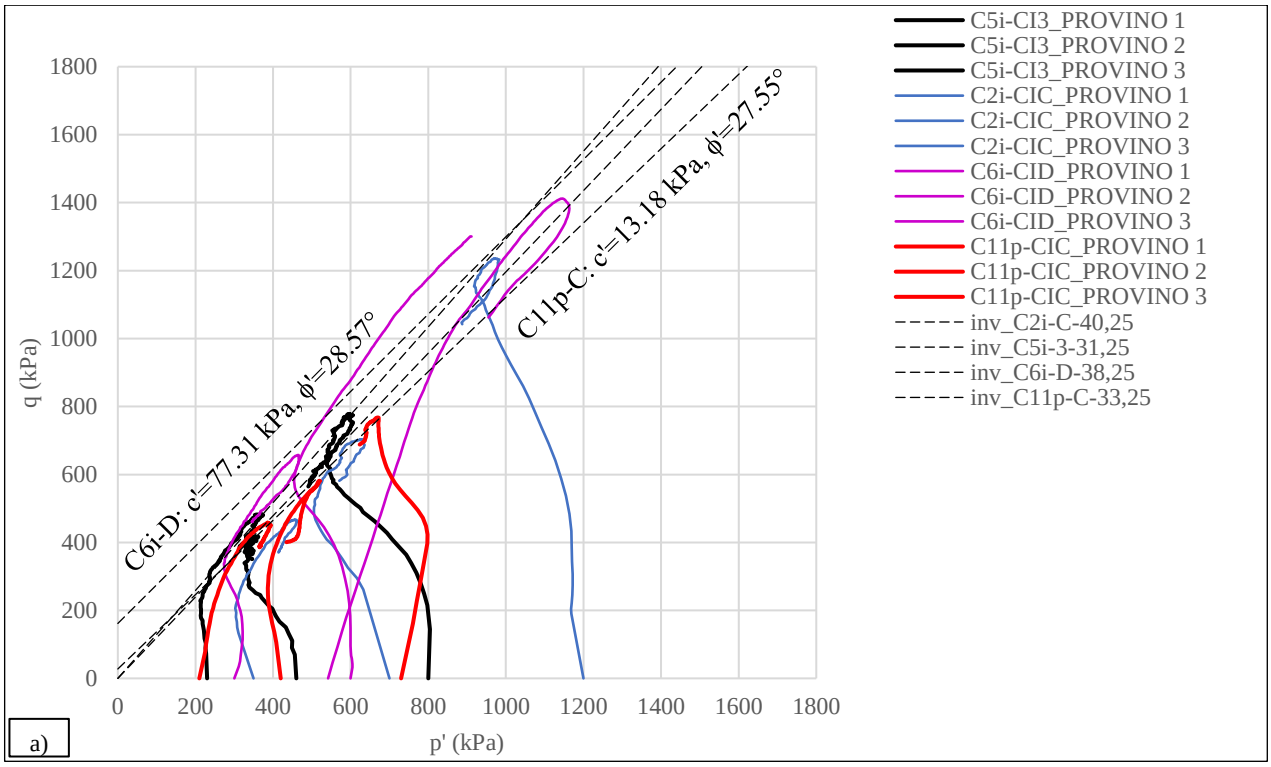
In generale, ripercorrendo quanto già detto per i campioni della Sub-unità 2b, quasi tutti i campioni presentano OCR bassi e quindi si ritiene di poter asserire che i terreni fini del pendio oggetto di studio si presentano o normal-consolidati o debolmente sovraconsolidati, poiché nella loro storia geologica non hanno subito uno scarico edometrico significativo.

Per dettagliare il comportamento meccanico a taglio dei materiali dell'Unità 3 sono state condotte prove triassiali non drenate su 9 campioni e prove di taglio diretto su 5 campioni (sempre tre provini a campione),

considerando che, nelle precedenti campagne geognostiche, solo un campione era stato sottoposto a prova di taglio diretto ciclico per indagarne la resistenza post-rottura (S6-C3).

Dai risultati delle prove TRX-CIU, riportati in Figura 2.10, si sono individuati due gruppi, uno costituito dai campioni mediamente più resistenti (Figura 2.10-a) con CF < 20 % ed SF > 40%, che esibiscono 25.4° < ϕ'_P < 36.8° e 23° < ϕ'_{ULT} < 34.6°, e l'atro da campioni a resistenza più bassa (Figura 2.10-b) con 21° < ϕ'_P < 27.7° e 18.3° < ϕ'_{ULT} < 24.4°, in quanto campioni di terreno a matrice prevalentemente fine (Tabella 2.8). I provini sottoposti a prove TD esibiscono un comportamento tendenzialmente wet, avendo OCR di poco superiore all'unità, mentre il solo C12i-A1, che esibisce un comportamento tipicamente dry, si raggruppa con i campioni più deboli del secondo gruppo di prova TRX-CIU (Figura 2.11).

Il valore medio di ϕ' in condizioni di picco per l'Unità 3 è $\phi'_{P,m}$ =29°, mentre quello ultimo $\phi'_{ULT,m}$ =26.2° (Tabella 2.9). I risultati sono sintetizzati nelle Tabella 2.8 e Tabella 2.9.



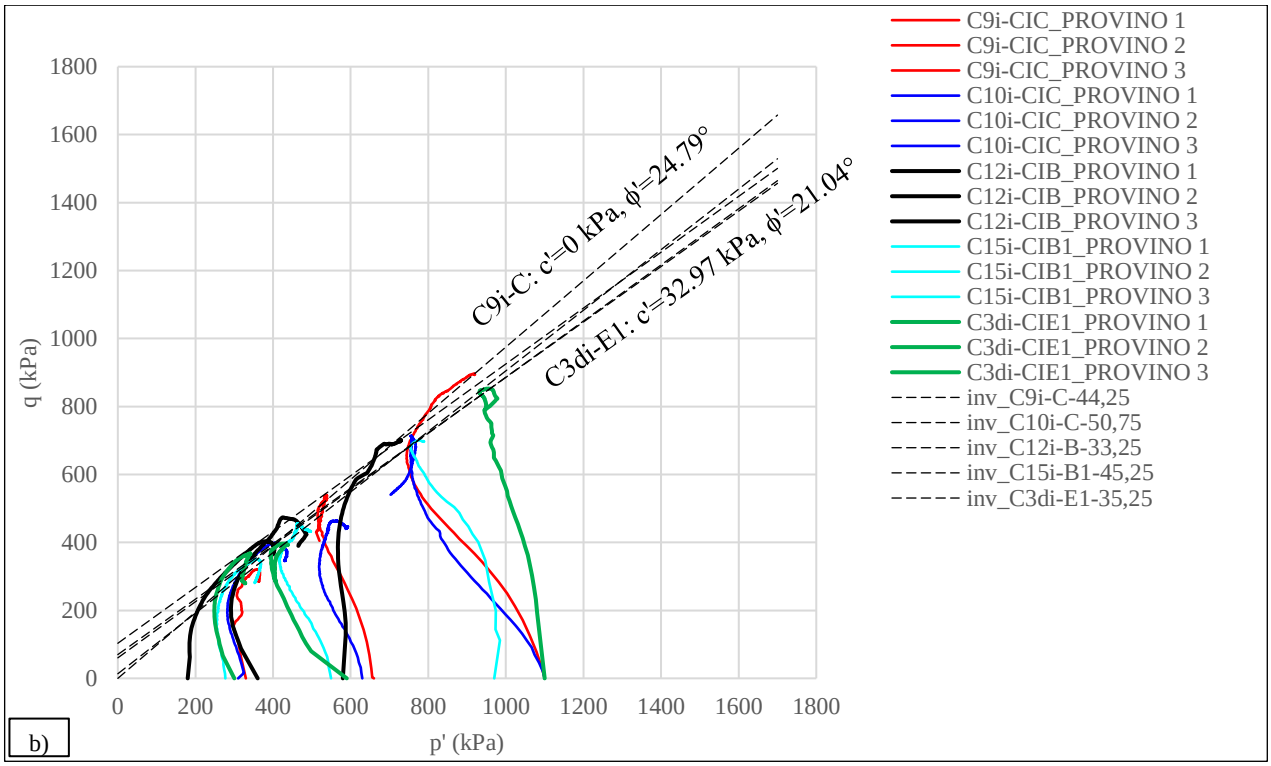


Figura 2.10 Percorsi di sforzo e inviluppi di resistenza esibiti nelle prove triassiali eseguite sui campioni afferenti all'unità 3.

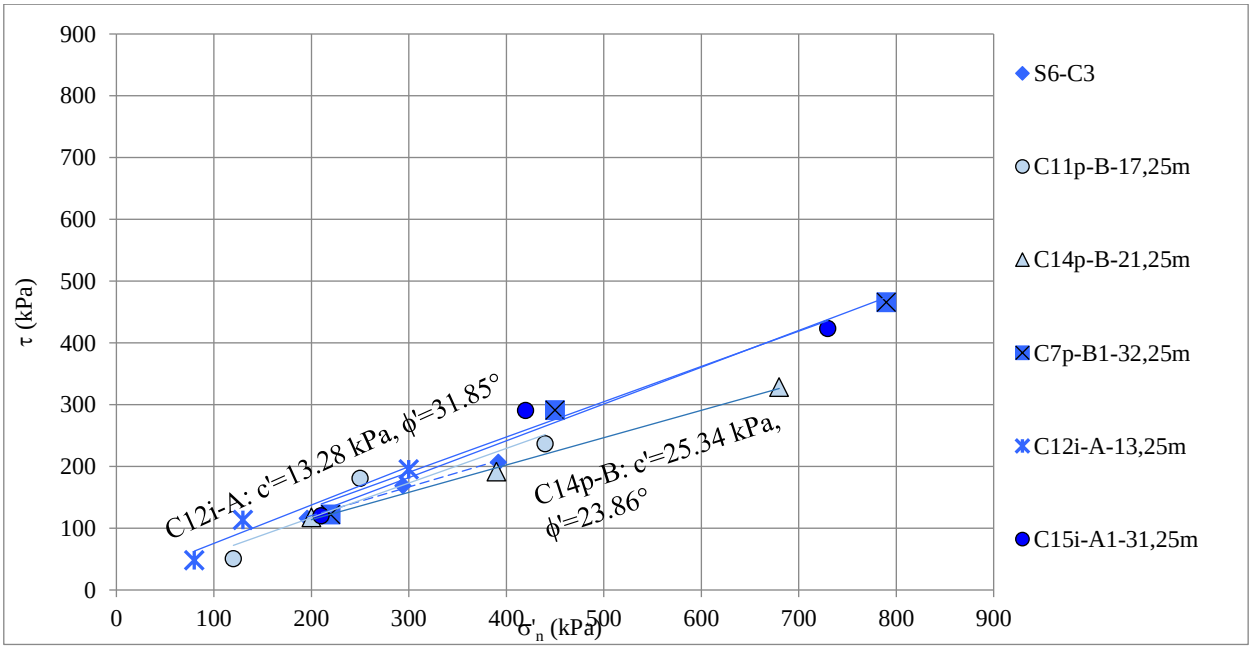


Figura 2.11 Inviluppi di resistenza di picco individuati per i campioni di taglio diretto afferenti all'unità 3.

Tabella 2.8 Inviluppi di resistenza di picco e di residuo per i campioni afferenti all'unità 3.

Sigla campione	**PICCO**		**POST-ROTTURA**
	c'	**ϕ'**	**ϕ'**
	kPa	°	°

C12i-A	13,28	31,85	
C14p-B	25,34	23,86	
C7p-B1	3,29	30,77	
C15i-A1	19,25	29,72	27,16
C11p-B	4,95	29,28	24,20
C5i-3		32,13	
C11p-C	13,18	27,55	
C12i-B	48,67	21,19	
C3di-E1	32,97	21,04	
C6i-D	77,31	28,57	
C2i-C		29,91	
C9i-C		24,79	
C15i-B1	28,46	21,29	
C10i-C	6,37	22,84	
S6-C3	27,50	24,91	17,41

Tabella 2.9 Parametri di resistenza di picco e ultimi per i campioni afferenti all'unità 3.

Sigla campione	**z slm**	**z da pc**	**Tipo di prova**	**CF**	**SF**	**n.**	**pressione di consolidazione**	**ϕ'_P**	**$\phi'_{P,m}$**	**ϕ'_{ULT}**	**$\phi'_{ULT,m}$**	**ϕ'_{PR}**	**$\phi'_{PR,m}$**
	m			%	%		kPa	°	°	°	°	°	°
C12i-A	117,88	13,25	TD	19,83	21,61	1	80	30,98	35,0	30,71	32,2	-	-
						2	130	41,10		33,99		-	
						3	300	33,06		31,82		-	
C14p-B	186,86	21,25	TD	22,70	24,90	1	200	30,43	27,5	27,68	25,6	-	-
						2	390	26,19		23,94		-	
						3	680	25,79		25,19		-	
C7p-B1	164,66	32,25	TD	16,55	32,93	1	220	29,11	30,8	27,28	29,3	-	-
						2	450	32,89		30,14		-	
						3	790	30,52		30,41		-	
C15i-A1	150,35	31,25	TD (5 cicli)	14,61	40,08	1	210	29,78	31,5	27,21	28,5	24,62	27,0
						2	420	34,71		31,11		30,10	
						3	730	30,10		27,29		26,36	
C11p-B	148,92	17,25	TD (5 cicli)	12,88	46,78	1	120	22,99	29,1	22,79	28,4	23,20	24,9
						2	250	35,91		34,28		28,98	
						3	440	28,31		28,22		22,65	
C5i-3	177,95	31,25	CIU	8,16	57,33	1	230	34,20	32,4	30,70	28,4	-	-
						2	460	30,37		25,68		-	
						3	800	32,74		28,88		-	
C11p-C	132,92	33,25	CIU	23,81	20,84	1	210	30,91	29,4	26,70	26,0	-	-
						2	420	28,18		23,54		-	
						3	730	29,08		27,79		-	

C12i-B	97,88	33,25	CIU	32,07	10,86	1	180	28,23	27,3	23,29	23,1	-	-
						2	360	28,13		21,59		-	
						3	580	25,59		24,39		-	
C3di-E1	188,99	35,25	CIU	19,50	23,03	1	300	28,67	25,4	21,92	20,6	-	-
						2	590	24,29		18,38		-	
						3	1100	23,19		21,54		-	
C6i-D	176,85	38,25	CIU	5,07	71,46	1	300	35,93	34,6	33,09	32,1	-	-
						2	600	36,79		35,19		-	
						3	541	31,22		27,97		-	
C2i-C	185,07	40,25	CIU	16,68	41,16	1	350	26,49	29,2	22,94	26,1	-	-
						2	700	29,27		25,80		-	
						3	1200	31,93		29,41		-	
C9i-C	165,68	44,25	CIU	25,99	22,65	1	330	23,19	24,8	20,27	21,7	-	-
						2	660	25,59		20,18		-	
						3	1100	25,51		24,72		-	
C15i-B1	136,35	45,25	CIU	42,55	5,43	1	280	26,01	24,8	20,55	21,8	-	-
						2	550	25,05		22,33		-	
						3	970	23,27		22,62		-	
C10i-C	141,08	50,75	CIU	38,80	7,37	1	310	26,09	23,9	20,78	20,1	-	-
						2	630	21,66		19,45		-	
						3	1100	24,07		19,94		-	
S6-C3	179,99	29,25	TD	10,69	56,41	1	196	30,62	29,4	30,40	29,3	17,29	17,4
						2	294	29,89		29,74		17,91	
						3	392	27,84		27,72		17,15	
MEDIA									**29,0**		**26,2**		**23,1**

Prove di TD cicliche su alcuni campioni di questa unità hanno portato ad individuare valori dell'angolo di post-rottura, $\phi'_{PR,}$ e $\phi'_{PR,m}$ medio, compresi tra 24° e 27°, con un valore di ϕ'_{PR} = 17,41° esibito dal campione S6-C3, della precedente campagna geognostica (Figura 2.12 e Tabella 2.9).

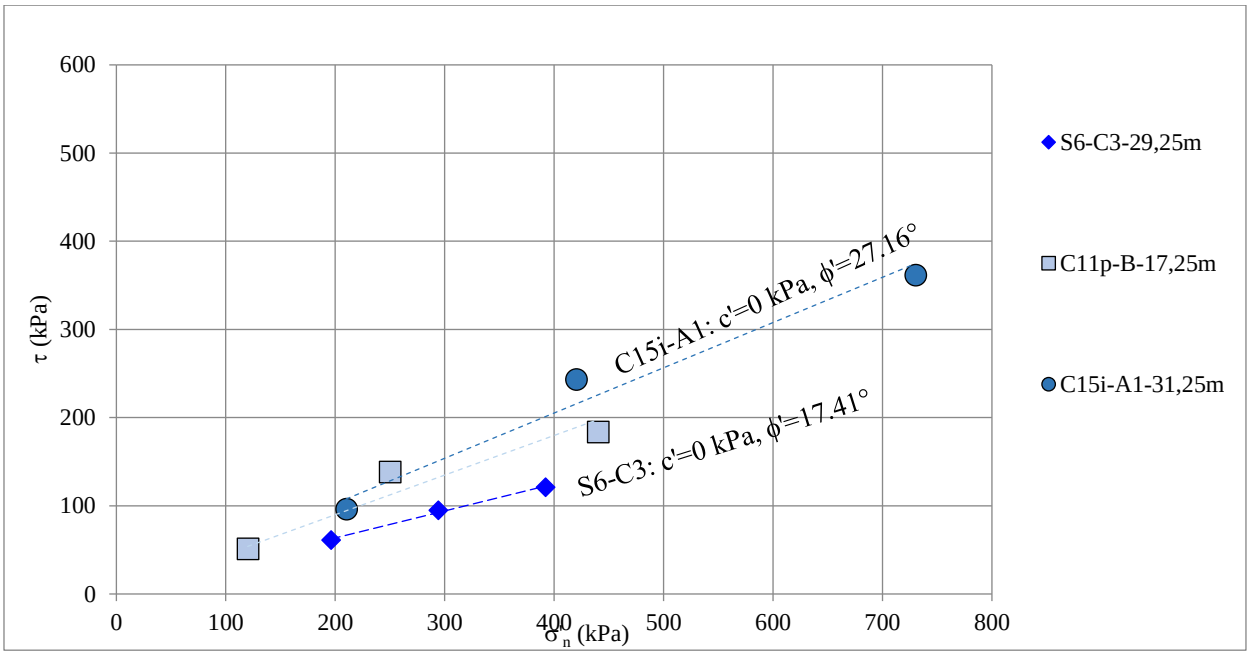


Figura 2.12 Inviluppi di resistenza post-rottura individuati per i campioni di taglio diretto afferenti all'unità 3.

Gli angoli di attrito esibiti dai campioni dell'Unità 3, diagrammati in funzione della frazione argillosa e sabbiosa validano la tendenza della resistenza a diminuire per CF più alte e SF più basse (Figura 2.13-a,b) e si presentano compresi tra 20.6° (ultimo) < ϕ'_{U3} < 35.04° (picco), con valori medi sull'unità di circa 29° per il picco e 26,2° per il valore ultimo. Tuttavia, questi valori non sono da ritenersi rappresentativi della resistenza della regione più profonda dell'Unità 3, caratterizzata da CF più elevate, ragion per cui si è ritenuto necessario sottoporre il campione C15i-B1 (136.35 m slm) a prova di taglio anulare Bromhead, presso il Laboratorio Geotecnico del Politecnico di Bari, per indagare il valore dell'angolo di resistenza residua della porzione più profonda dell'unità in oggetto, sede delle bande di taglio profonde attive (capitolo 1), lungo le quali si può ritenere essere stata mobilizzata già la resistenza residua dei materiali, trattandosi di un contesto franoso di carattere paleofrana. La resistenza residua dei materiali nel pendio è discussa nella sezione 2.2.

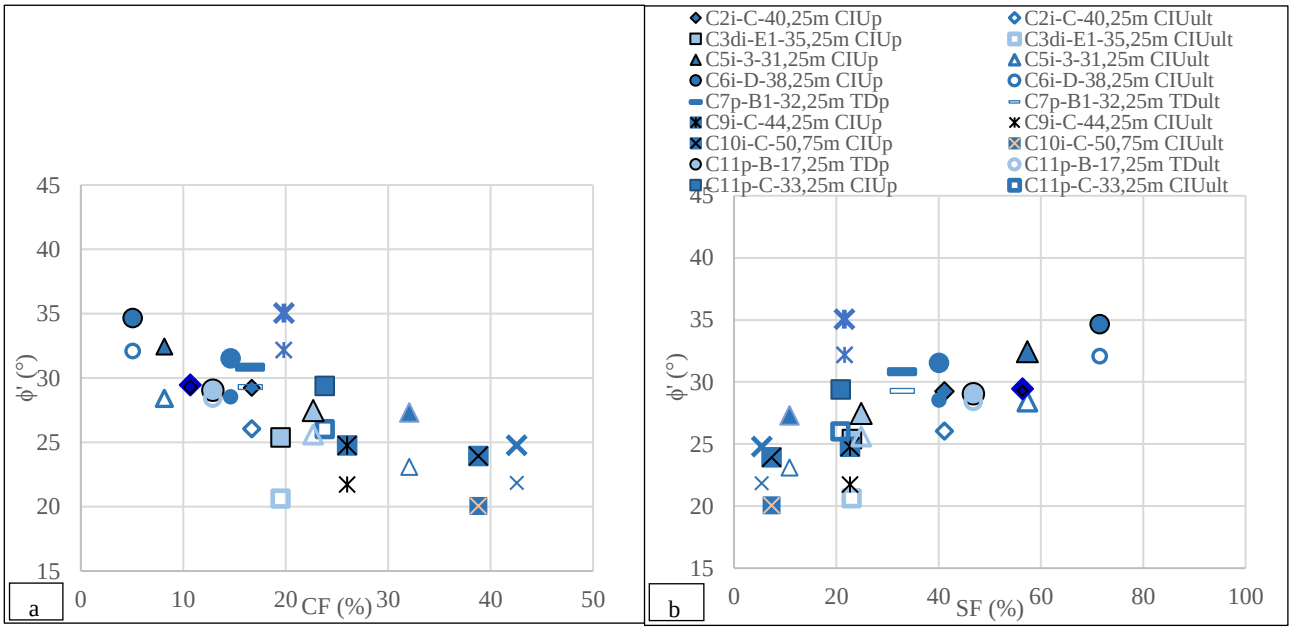


Figura 2.13 Andamento dei valori di □' medio di picco (simbolo pieno) e ultimo (simbolo vuoto) in relazione con la CF e la SF per i campioni afferenti all'unità 3 (a,b).

2.1.5 Sintesi

Nella Figura 2.14 si riportano gli inviluppi di resistenza di picco, sia da Taglio Diretto che da Triassiale, per tutti i campioni delle Sub-unità 2a e 2b e dell'Unità 3, con indicazione dei valori di c' e ϕ' che racchiudono il fuso per ciascuna unità.

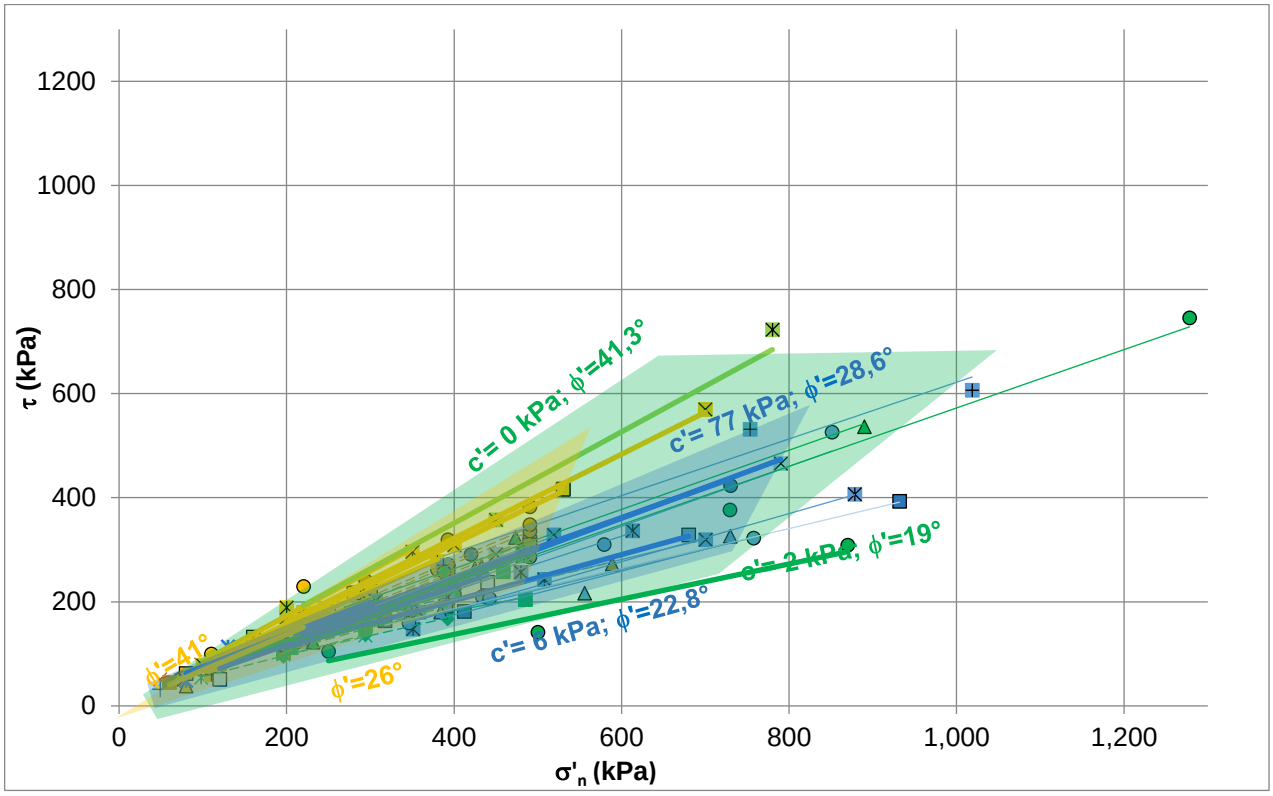


Figura 2.14 Inviluppi di resistenza di picco (TD e TRX) per tutti i campioni delle unità 2a (gialla), 2b (verde) e 3 (blu), con indicazione dei valori di c' e ϕ' che racchiudono il fuso per ciascuna unità.

Nella Figura 2.15 si mostra il profilo dei valori dell'angolo di attrito di picco e ultimo per i provini di ciascun campione in funzione della quota assoluta s.l.m. Nella figura sono anche riportati, retinati, gli intervalli del valore medio di ϕ', desunto per ciascun campione, che sono da ritenersi intervalli di ϕ'_{medio} rappresentativi per ciascuna unità, che sono elencati nel seguito:

- Unità 1 $13.7° < \phi'_{U1} < 30.8°$
- Sub-unità 2a $26.3° < \phi'_{sU2a} < 41°$
- Sub-unità 2b $24° < \phi'_{sU2b} < 34°$
- Unità 3 $20° < \phi'_{U3} < 27°$

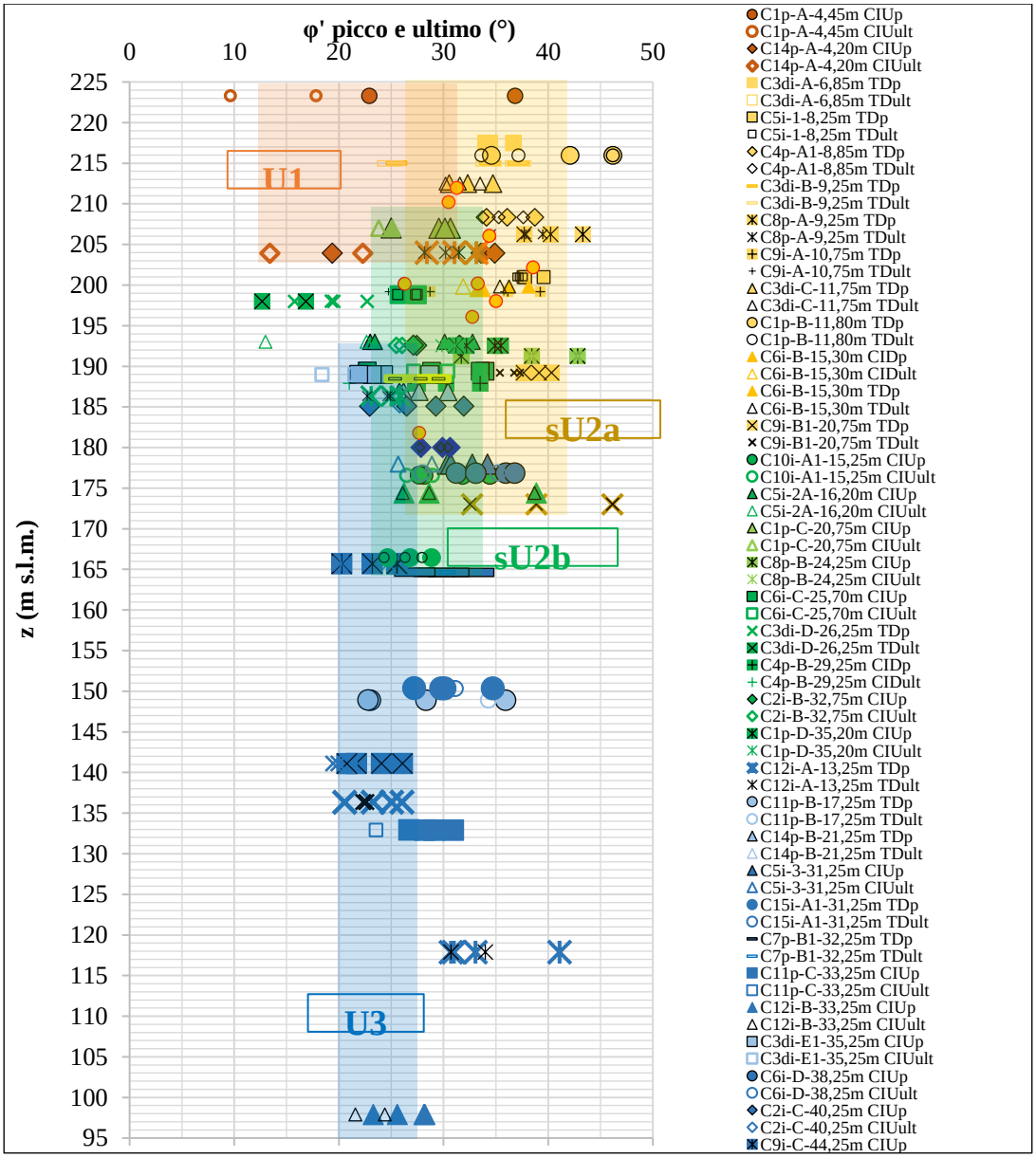


Figura 2.15 Profilo con la profondità (quota assoluta) dei valori di ϕ'di picco (simbolo pieno) e ultimo (simbolo vuoto) per i provini di ciascun campione. Indicazione degli intervalli dei parametri di resistenza rappresentativi per ciascuna unità: unità 1: 13.74°.

2.2 Resistenza a taglio residua

Come anticipato, al fine di valutare la resistenza residua e, quindi, l'angolo di attrito residuo ϕ'_R rappresentativo della Sub-unità 2b e dell'Unità 3, si sono condotte prove di taglio anulare con apparecchio di Bromhead, in dotazione presso il Laboratorio Geotecnico del Politecnico di Bari. Si precisa che tali prove sono state eseguite successivamente alla conclusione della campagna sperimentale svolta presso Geo, e alla consegna della I Relazione di II fase, pertanto i risultati, qui discussi per la prima volta, rappresentano un avanzamento nell'analisi ed interpretazione del comportamento meccanico dei terreni di Chieuti.

Si fa presente, inoltre, che tali prove sono state ritenute essenziali per la caratterizzazione del comportamento della Sub-unità 2b e dell'Unità 3 in condizioni di residuo, non desumibile attraverso prove di taglio convenzionali.

Le prove sono state eseguite su provini di argilla rimaneggiata ottenuti dai campioni indisturbati C2i-B (192.57 m slm) e C15i-B1 (136.35 m slm). Questi campioni sono stati scelti in quanto ritenuti rappresentativi, per composizione granulometrica e per risposta meccanica esibita nelle prove meccaniche già discusse, rispettivamente della Sub-unità 2b e dell'Unità 3.

Utilizzando l'apparecchio di taglio anulare si è proceduto in primo luogo alla consolidazione dei due provini applicando diversi step di carico per consentire il progressivo raggiungimento del livello tensionale desiderato e, conclusa la fase di consolidazione, i provini sono stati sottoposti a prova di taglio anulare, imponendo una bassa velocità di rotazione angolare, affinché raggiungessero la resistenza residua corrispondentemente alla quale è stato possibile individuare l'angolo di attrito residuo ϕ'_r.

Preliminarmente all'esecuzione della prova si è proceduto alle necessarie operazioni di taratura dei trasduttori.

2.2.1 Preparazione dei provini e fase di consolidazione

Per garantire risultati incondizionati dalla struttura naturale del terreno, basati esclusivamente sulla composizione del materiale e del fluido interstiziale, è necessario disporre di un materiale la cui struttura veda obliterati il più possibile i caratteri diagenetici.

I campioni sono stati pertanto rimaneggiati con acqua distillata e lavorati con spatola al fine di ottenere un impasto omogeneo e di consistenza adeguata alla messa in prova nella scatola toroidale dell'apparecchio di Bromhead.

Raggiunta la consistenza desiderata, prima di mettere in opera il provino nella scatola, è stato determinato il contenuto d'acqua mediante essiccamento in forno a 110° di un volume rappresentativo. Per il provino della Sub-unità 2a, il C2i-B (IP = 13.75%), si è raggiunto un w = 29.21%, ove LP=19.96% e LL=33.71%, mentre per il provino dell'Unità 3, il C15i-B1, il w raggiunto è stato pari a 34.18%, considerando che i limiti di tale campione sono risultati LP=24.48% e LL=54.44%.

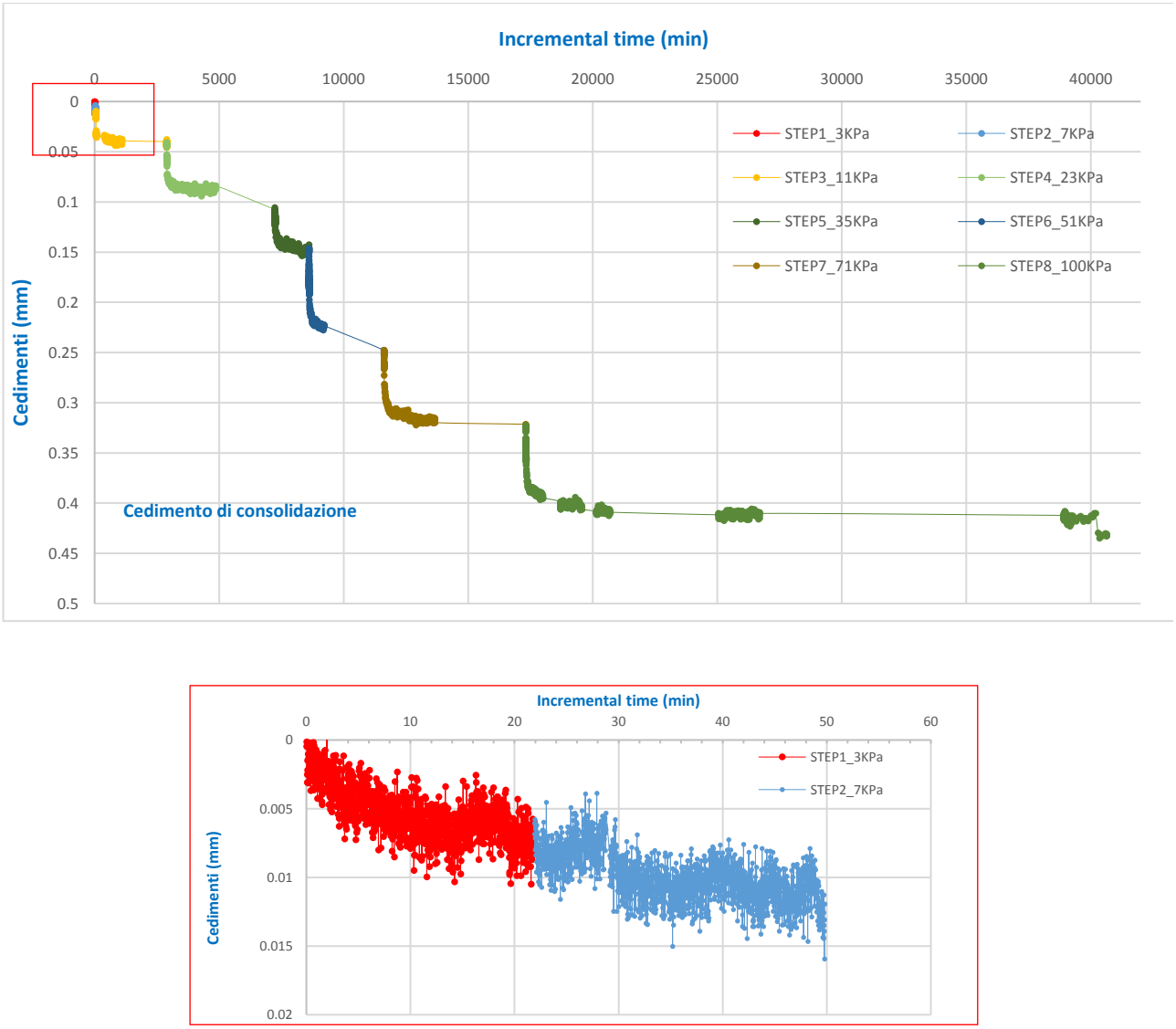


Figura 2.16 C2i-B: Cedimenti registrati in seguito all'applicazione dei diversi incrementi di carico di consolidazione.

Preparato il materiale, la parte superiore del provino è stata posta a livello con il top degli anelli di confinamento della scatola toroidale dell'apparecchio di Bromhead, in modo da posizionare in asse al top l'asta di carico e consentire al trasduttore di spostamento LVDT di leggere i cedimenti nel corso della prova.

La prova viene eseguita in condizioni drenate. Ciascun provino è stato consolidato per step di carico progressivi, mediante l'apposita asta di carico munita di braccio con rapporto 1:10.

In particolare, per il provino C21-B sono stati applicati otto step di carico progressivi (σ'_v: 3, 7, 11, 23, 35, 51, 71, 100 kPa), raggiungendo un cedimento massimo a fine consolidazione pari a 0.43 mm (Figura 2.16).

Per il provino C15i-B1 sono stati applicati sette step di carico progressivi (σ'_v: 3, 7, 11, 23, 35, 51, 71 kPa), raggiungendo un cedimento massimo di consolidazione pari a 0.36 mm (Figura 2.17).

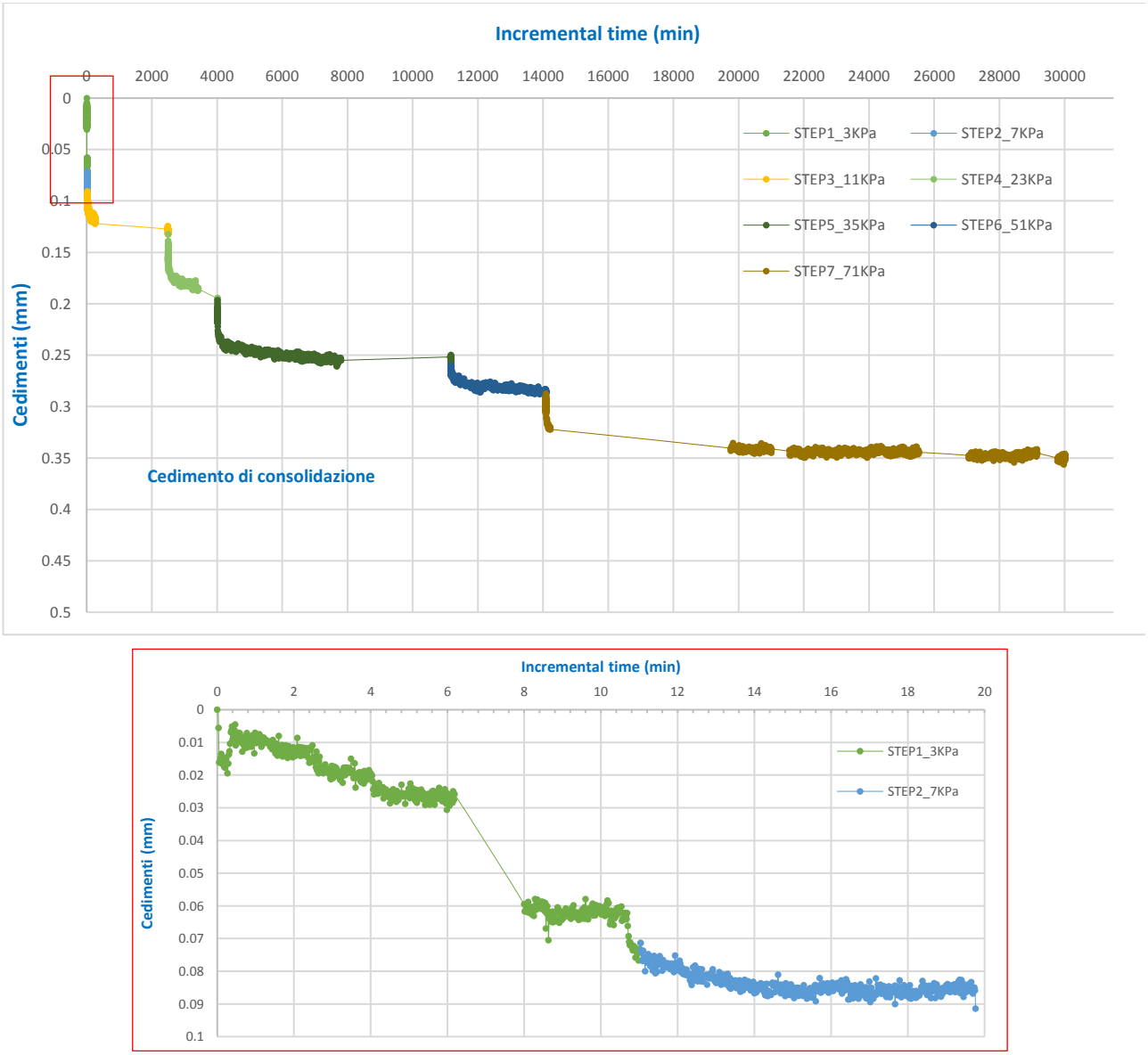


Figura 2.17 C15i-B1: Cedimenti registrati in seguito all'applicazione dei diversi carichi di consolidazione.

2.2.2 Fase di taglio e risultati

Conclusa la fase di consolidazione, si è proceduto per entrambi i provini alla successiva fase di taglio, impostando una lunghezza del braccio della coppia di vincolo di 15 cm e imponendo una velocità d'avanzamento minima di 0,024 gradi°/min, attraverso l'uso degli ingranaggi E=30-60.

Nell'elaborazione dei dati di prova si assume che la distribuzione delle tensioni di taglio sia uniforme al raggiungimento della resistenza residua e il momento torcente M_t pari a:

$$M_t = \frac{2}{3}\pi\,(R_2^3 - R_1^3)\,\tau \qquad (2.1)$$

con R_1 ed R_2 rispettivamente raggio interno di 35 mm ed esterno di 50 mm del provino, con spessore di 5mm. Considerando la coppia torcente di forze F_1 ed F_2, misurate dalle due celle di carico collocate nei vincoli, e noto il braccio di tale coppia L=15 cm, il momento torcente è pari anche a:

$$M_t = (F_1 + F_2)\,\frac{L}{2} \qquad (2.2)$$

Per l'equilibrio è possibile dedurre il corrispondente valore di τ:

$$M_t = \frac{3}{4\pi} \frac{(F_1+F_2)}{(R_2{}^3 - R_1{}^3)} L \qquad (2.3)$$

Essendo lo sforzo efficace pari a $\sigma' = \frac{P}{\pi (R_2{}^3 - R_1{}^3)}$,

con P carico assiale a cui è stato sottoposto il provino, ne consegue che:

$$\frac{\tau}{\sigma'} = \tan \phi'_r = \frac{3}{4} \frac{(F_1+F_2)((R_2{}^3 - R_1{}^3)}{(R_2{}^3 - R_1{}^3)\, P} L \qquad (2.4)$$

dunque $\phi'_r = \text{arctg} \frac{\tau}{\sigma'}$

Campione C2i-B

Il campione C2i-B (192.57 m slm), che esibisce OCR=1.2 in prova edometrica, è stato sottoposto a TRX-CIU, in cui ha esibito rammollenza e leggera dilatanza, con valore di angolo di attrito al picco in media $\phi'_{P,m}$=29.6°, ed angolo di attrito ultimo $\phi'_{ULT,m}$ =26.4°.

In particolare, il campione C2i-B ha esibito mediamente i seguenti valori: $\phi'_{P,m}$ =31,5° $\phi'_{ULT,m}$ =26,6°.

L'andamento dello sforzo di taglio indotto nel provino sottoposto alla prova di taglio anulare, in funzione degli spostamenti orizzontali, è mostrato in Figura 2.18, sino al raggiungimento del valore di resistenza al taglio residua, mentre il valore complessivo di cedimento misurato a fine prova è mostrato in Figura 2.19.

Tabella 2.10 C2i-B: Tabella riassuntiva dei risultati di Prova di taglio anulare Bromhead.

Ft_max (kgf)	Ft_max (kN)	τ_{max} (kPa)	σ'_n (kPa)	$\phi'_{r\text{-}C2i\text{-}B}$
5,890342	0,058903421	51,36860612	100	27,18893382

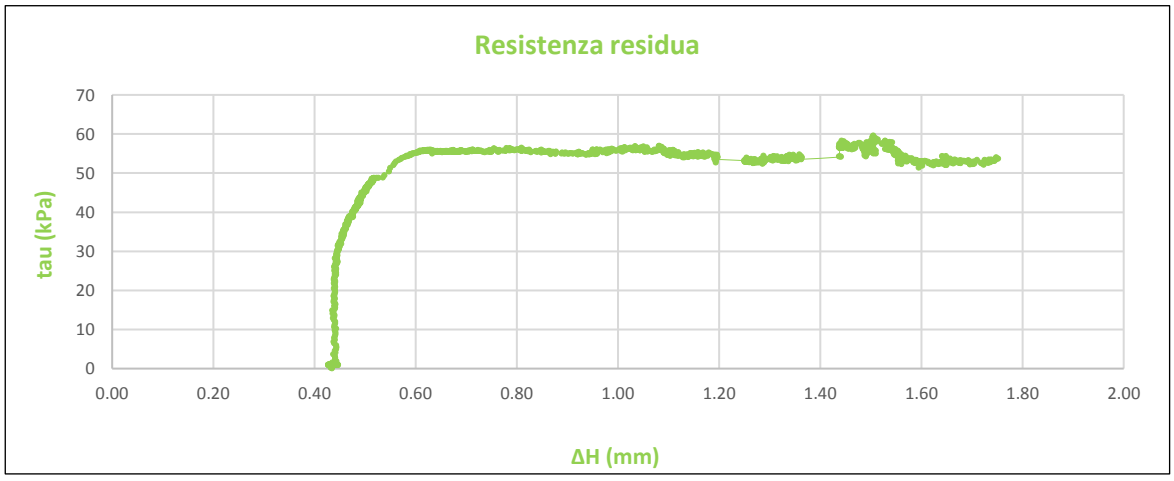


Figura 2.18 C2i-B: Andamento dello sforzo di taglio in funzione degli spostamenti ΔH registrati in fase di taglio.

In termini di resistenza residua, il campione esibisce $\phi'_{r\text{-}C2i}$ =27,2°, che appare piuttosto elevato rispetto a quanto atteso per l'unità 2b. Ciò sembra dipendere dalla composizione del campione, che ricade in una porzione del

versante che, alla profondità indagata, si caratterizza per livelli con matrice prevalentemente sabbiosa più che limoso/argillosa (SF=43.80%, MF=40.01%, CF=16.19%).

Si ritiene, viceversa, più rappresentativo del valore di angolo di attrito a residuo dell'Unità 2b il risultato della prova di taglio diretto ciclica sul campione S1-C2, ove c'=0 e ϕ'_r=16.3° (Figura 2.8).

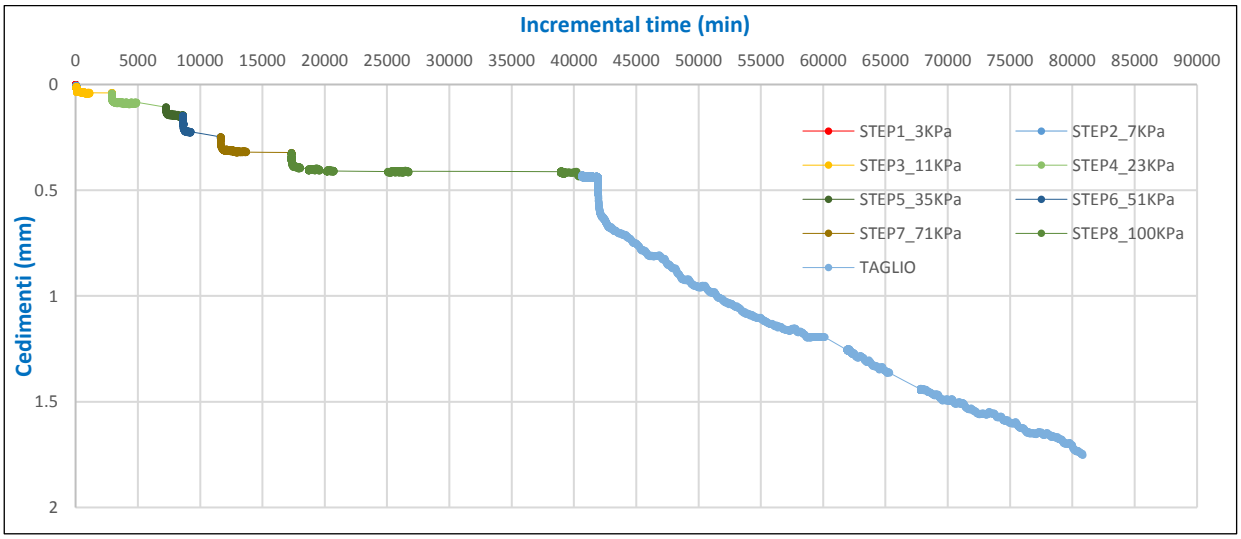


Figura 2.19 C2i-B: Cedimenti registrati in fase di consolidazione e in fase di taglio.

Campione C15i-B1

Come anticipato, dai risultati su riportati delle prove TRX-CIU condotte sui campioni afferenti all'Unità 3, si sono individuati due gruppi, uno costituito dai campioni mediamente più resistenti (Figura 2.10-a) con CF<20% ed SF>40%, che esibiscono 25.4° < ϕ'_P < 36.8° e 23° < ϕ'_{ULT} < 34.6°, l'atro invece da campioni a resistenza più bassa (Figura 2.10-b) con 21° < ϕ'_P < 27.7° e 18.3° < ϕ'_{ULT} < 24.4° (sintesi in Tabella 2.9).

Il campione C15i-B1 (136.35 m slm e a una profondità media di 45.25 m da p.c.) esibisce mediamente i seguenti valori: $\phi'_{P,m}$ =24,8° $\phi'_{ULT,m}$ =21,8°, rientrando dunque nel gruppo di campioni meno resistenti (con CF=42.55%, MF=52.02%, SF=5.43%).

Tuttavia, prove di taglio diretto cicliche condotte su alcuni campioni di questa unità hanno portato ad individuare un valore dell'angolo di post-rottura ϕ'_{PR} e $\phi'_{PR,m}$ compresi tra 24° e 27° (Figura 2.12 e Tabella 2.8) che sono ben lontani dall'essere rappresentativi della regione più profonda dell'Unità 3, caratterizzata da CF più elevate, ragion per cui si è ritenuto necessario sottoporre il campione C15i-B1 a prova di taglio anulare Bromhead, per indagare il valore dell'angolo di resistenza residua della porzione più profonda di questa unità.

Si riportano di seguito i valori ottenuti durante la successiva fase di taglio e i relativi grafici che rappresentano l'andamento dello sforzo di taglio indotto nel provino in funzione degli spostamenti orizzontali (Figura 2.20), sino al raggiungimento del valore di resistenza al taglio residua e il valore complessivo di cedimento misurato a prova conclusa (Figura 2.21).

I valori più bassi di resistenza meccanica per i campioni dell'Unità 3, riscontrati in profondità non solo lungo la verticale C12i in zona di piede, ma anche lungo C10i e C15i, in posizione centrale nel versante in frana (sezioni C e D; campioni C10i-C e C15i-B), e lungo C9i in zona di monte (sezione E; campione C9i-C), a conferma della riduzione di resistenza meccanica nei terreni maggiormente argillosi profondi, è compatibile

con una ancor maggiore profondità delle bande di taglio confinanti i corpi di frana P1 e P2, dunque con la presenza di una zona fortemente disturbata, sede di discontinuità che può considerarsi essere in una condizione di resistenza residua con ϕ'r-C15i =15,3°, come ricavato dall'elaborazione dei dati della prova di taglio anulare Bromhead, trattandosi come anticipato di fenomeni franosi che devono essere contestualizzati in una dinamica di paleofrana.

Tabella 2.11 C15i-B1: Tabella riassuntiva dei risultati di Prova di taglio anulare Bromhead.

F_t_max (kgf)	F_t_max (kN)	τ_{max} (kPa)	σ'_n (kPa)	$\phi'_{r\text{-}C15i_B1}$
2,215272	0,02215272	19,3189857	71	15,22157558

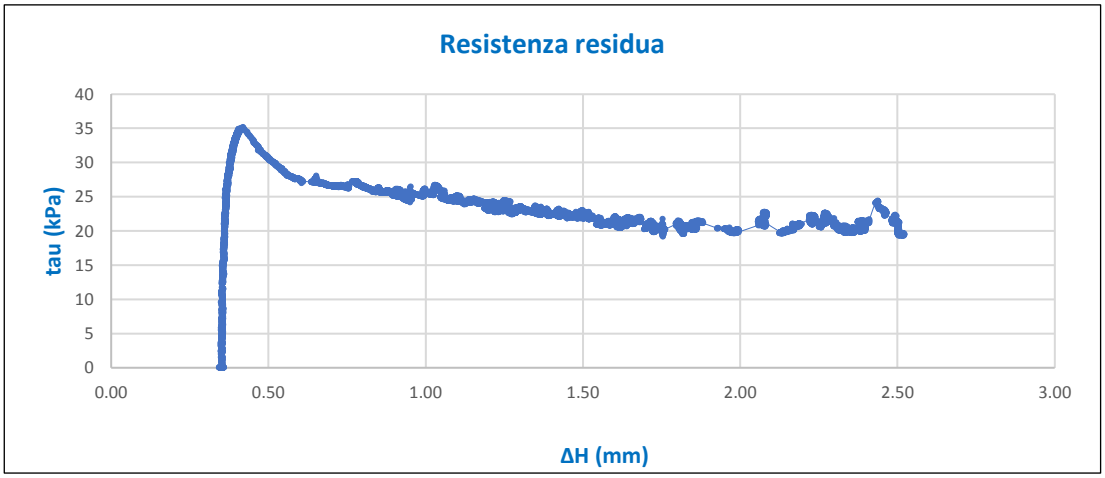


Figura 2.20 C15i-B1: Andamento dello sforzo di taglio in funzione degli spostamenti ΔH registrati in fase di taglio

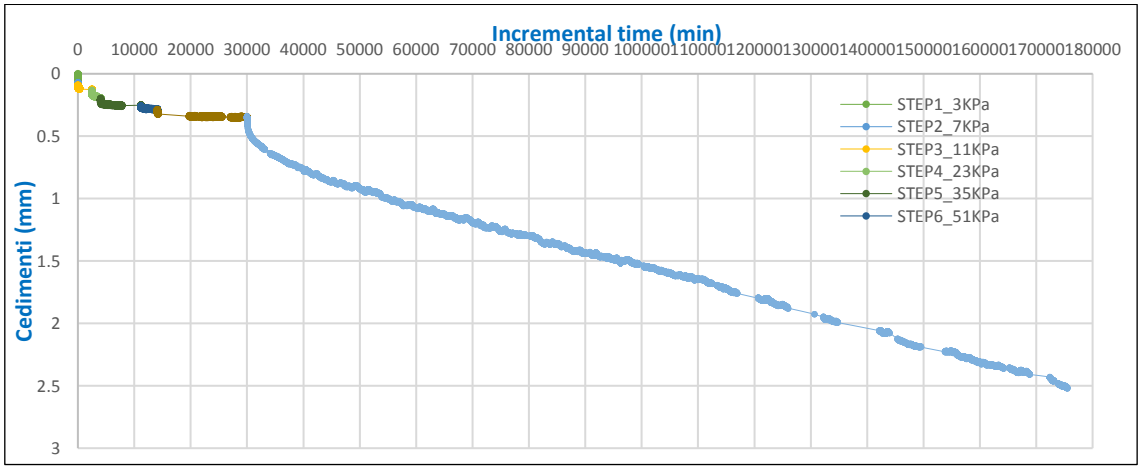


Figura 2.21 C15i-B1: Cedimenti registrati in fase di consolidazione e in fase di taglio.

3 AVANZAMENTO NELL'INTERPRETAZIONE DELL'ASSETTO PIEZOMETRICO DEL VERSANTE OCCIDENTALE DI CHIEUTI

3.1 Aggiornamento del monitoraggio piezometrico

L'attività di monitoraggio piezometrico già dettagliatamente discussa e commentata nel Capitolo 8 della I Relazione di II Fase, è proseguita successivamente con la misura nel tempo dei livelli piezometrici relativi sia alle celle piezometriche installate nell'ambito della campagna geognostica Apogeo 2020-21, sia ai piezometri installati in passato e attualmente ancora funzionanti o ripristinati (Figura 2.).

In particolare, si ricorda che nell'ambito della campagna geognostica effettuata da INGE nel 2013, diversi sondaggi furono attrezzati con piezometri a tubo aperto o celle di Casagrande. Nell'ambito della campagna geognostica ad opera di Apogeo (2020-21), la stessa ditta INGE fu ricontattata per l'effettuazione di operazioni di ripristino di alcune delle strumentazioni installate, che permisero il successivo monitoraggio piezometrico lungo le verticali INGE: 13S1p, 13S2p, 13S6p, 13S7p, 13S10 (Figura 3.1).

A seguito della consegna della I Relazione di II Fase (Gennaio 2022) si è altresì monitorato il pelo libero lungo alcune verticali di sondaggio che durante la campagna geognostica INGE del 2013 furono attrezzate con rivestimento inclinometrico, in particolare nei sondaggi: 13S1i, 13S2i, 13S3i, 13S6i e 13S7i.

I dati monitorati nell'ambito delle dianzi citate campagne di rilievo piezometrico, specificamente relativi alle celle di Casagrande, ai piezometri a tubo aperto e a e alle tubazioni inclinometriche, sono riportati, in termini di livello riferito al piano campagna (z=0) in Tabella 2.12 e Tabella 2.13, la prima relativa alle verticali terebrate durante la campagna INGE 2013, la seconda relativa alle verticali della campagna APOGEO. Nella carta geomorfologica in Figura 2. è mostrata la posizione di tutte le verticali sede dei citati rilievi. Dunque, i livelli nelle tabelle, hanno segno negativo in quanto rappresentano le altezze piezometriche rispetto al piano campagna assunto di altezza geodetica z=0.

I rilievi cui si fa riferimento sono stati svolti in sette date: Misura 0 - 22-26/02/21; Misura 1 - 16-18/06/21; Misura 1bis - 30-31/07-01/08/21; Misura 2 - 16-19/10/21; Misura 3 - 22-25/02/22; Misura 4 - 20-25/07/22; Misura 5 - 28-29/11/22, 02-03/12/22.

Come rilevabile dai dati nella Tabella 2.12, le misure di pelo libero all'interno delle tubazioni inclinometriche e all'interno dei tubi aperti INGE, come anche i livelli piezometrici misurati nelle celle Casagrande INGE, non hanno subito significative variazioni rispetto a quelli monitorati fino alla Misura 2 e riportati nella I Relazione di II Fase. Difatti, negli inclinometri 13S2i e 13S7i, così come nel tubo aperto installato nel sondaggio 13S2p, non si è mai rilevata la presenza di battete idrico (fondo foro al di sopra del pelo libero), mentre nelle altre tubazioni inclinometriche e negli altri piezometri a tubo aperto i livelli rilevati sono stati praticamente costanti durante l'intero intervallo di osservazione. Sono state rilevate al massimo variazioni dell'ordine dei centimetri, o al più di pochi decimetri.

Come già segnalato nella I Relazione di II Fase (§8), continua ad essere peculiare il dato di monitoraggio relativo al piezometro a tubo aperto 13S10, profondo 10 metri e posizionato nella zona immediatamente a monte dell'opera di sostegno nella zona nord, tra le due scarpate SR1 e SR2 (Figura 2.). Difatti, considerando

il regime piezometrico in tale zona, il livello rilevato nel tubo aperto 13S10 risulta non essere coerente con il contesto piezometrico documentato dagli altri rilievi, risultando parecchio superiore ai livelli piezometrici nel suo intorno. Si continua a ritenere, dunque, che il livello idrico rinvenuto nel 13S10 sia connesso ad una alimentazione locale, possibilmente derivante da flussi effimeri sospesi all'interno della sub-unità 2a, probabilmente connessi a perdite da infrastruttura fognaria interrata in questa zona del centro abitato, che può essere stata danneggiata dagli spostamenti connessi al processo di retrogressione dell'attività franosa in scarpata.

La Tabella 2.12 riporta anche le letture piezometriche nelle celle di Casagrande installate lungo le verticali 13S1p, 13S2p, 13S6p e 13S7p. Per la cella a 29.5 m di profondità nel 13S1p, non sono stati più disponibili dati per l'inaccessibilità della cella, come già riportato nel §8 della I Relazione di II Fase. Di contro, la cella Casagrande posizionata a 28 m di profondità lungo il 13S7p ed installata nella sub-Unità 2b, è risultata accessibile a partire dalla Misura 4 (Come rilevabile dai dati nella), fornendo una misura coerente con quella del tubo aperto 13S7p, ma non con il livello piezometrico rilevato nella cella installata ad 11 m di profondità lungo la stessa verticale, ritenuto però non affidabile già nella I Relazione di II Fase (quindi scartato anche nella presente analisi). Lungo la verticale 13S7p, quindi, il livello del pelo libero è ritenuto attestarsi poco al di sopra del contatto tra la sub-unità 2a e la sub-unità 2b. Invece, lungo la verticale 13S2p, la cella Casagrande, installata a 15,5 m di profondità da piano campagna nella sub-Unità 2b, mostra un livello piezometrico che si posiziona nella stessa sub-Unità 2b.

Per la verticale piezometrica 13S6p, la cella Casagrande a 26 m da piano campagna, nella sub-Unità 2b, mostra un livello piezometrico che si posiziona poco al di sopra del contatto tra la sub-Unità 2a e la sub-Unità 2b, similmente a quanto succede per la cella Casagrande più profonda lungo la verticale 13S7p.

In generale, come per i livelli rilevati all'interno dei tubi aperti e delle tubazioni inclinometriche (Tabella 2.12), anche i livelli rilevati per le celle di Casagrande non hanno subito apprezzabili variazioni nel tempo, corroborando l'ipotesi di stazionarietà del regime di filtrazione nel versante sul lungo periodo. La discontinuità del monitoraggio dei livelli relativi alle sub-Unità 2a e 2b non permette però di escludere delle oscillazioni sul breve periodo.

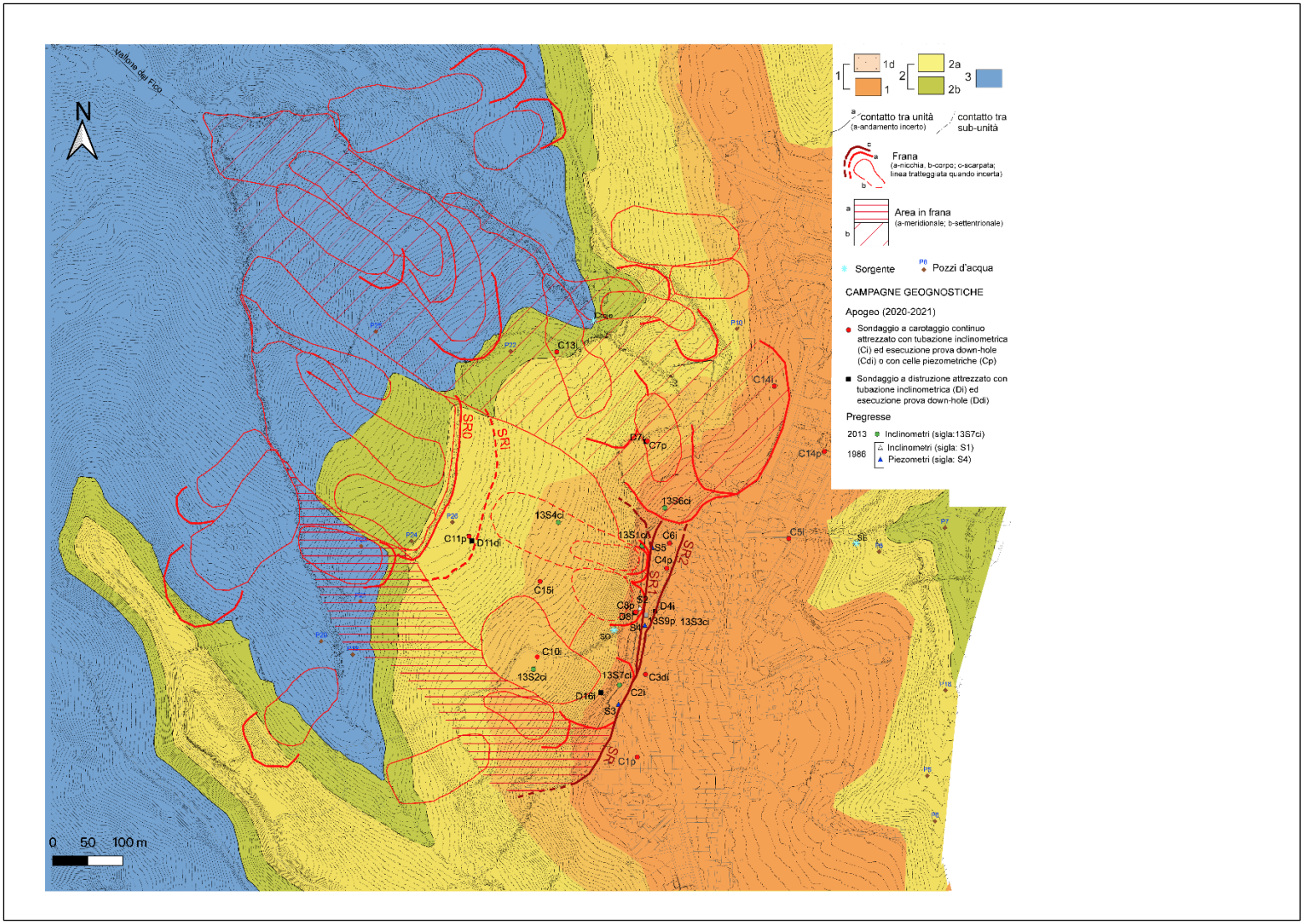


Figura 2.1 Carta litostratigrafico-geomorfologica del versante occidentale di Chieuti finale e andamento planimetrico delle direzioni dell'azimut misurato lungo le bande di taglio intercettate dagli inclinometri o quelle relative alla deformazione del tubo inclinometrico.

Tabella 2.12 Tabella riassuntiva dei sondaggi terebrati nella campagna INGE-2013 e che sono stati sede di rilievi piezometrici nell'ambito della nuova campagna geognostica.

SONDAGGIO	Attrezzatura installata	Unità	Misura 0 del 22-26/02/21 (m da p.c.)	Misura 1 del 16-18/06/21 (m da p.c.)	Misura 1bis del 30-31/07 01/08/21 (m da p.c.)	Misura 2 del 16-19/10/21 (m da p.c.)	Misura 3 del 22-25/02/22 (m da p.c.)	Misura 4 del 20-25/07/22 (m da p.c.)	Misura 5 del 28-29/11/22 02-03/12/22 (m da p.c.)
13S1i	Inclinometro (40 m)	-----	-19,19	-19,21	-19,42	-19,41	-19.30	Bloccato	Bloccato
13S2i	Inclinometro (33 m)	-----	Anidro (-33,00)	Anidro (-33,00)	Anidro (-33,00)	Anidro (-33,00)	Anidro (-33,00)	Anidro (-33,00)	Anidro (-33,00)
13S3i	Inclinometro (49 m)	-----	-23,3	-23,31	-----	-23,11	-23.42	-23.31	-23.14
13S6i	Inclinometro (36,5 m)	-----	-19,28	-19,28	-19,27	-19,29	-19,28	-19.22	-19.25
13S7i	Inclinometro (39 m)	-----	Anidro (-39,00)	Anidro (-39,00)	Anidro (-39,00)	Anidro (-39,00)	Anidro (-39,00)	Anidro (-39,00)	Anidro (-39,00)
13S1p	Tubo Aperto (0-26,5 m)	-----	-20,09	-20,04	-20,05	-20,15	-20.07	-19.93	-20.05
	Cella Casagrande (29,5 m)	3	-20.15/ bloccato	-20.10/ bloccato	-20,12/ bloccato	-20,21/ bloccato	-20.13/ bloccato	-19,99/ bloccato	-20,11/ bloccato
13S2p	Tubo Aperto (0-13,4 m)	-----	Anidro (-13,40)	Anidro (-13,40)	Anidro (-13,40)	Anidro (-13,40)	Anidro (-13,40)	Anidro (-13,40)	Anidro (-13,40)
	Cella Casagrande (15,5 m)	2b	-15.35 / -15.35	-15,39/ -15,39	-15,40/-15,42	-15,47/ -15,47	-15,48/ -15,48	-16,17/ -bloccato	-15,35/ -15,35
13S6p	Tubo Aperto (0-22,5 m)	-----	-19,21	-19,11	Bloccato (-19,3m)	Boccato (-19,3m)	Bloccato (-19,3m)	-19,07	Bloccato (-19,3m)
	Cella Casagrande (26 m)	2b	-19.81/ -19.81	-19,64/ -19,63	-19,69/ -19,70	-19,79/ -19,80	-19,36/ -19,62	-19,62/ -19,62	-19,69/ -19,69
13S7p	Tubo Aperto (0-25,5 m)	-----	-23,72	-23,69	-23,69	-23,75	-23,7	-23,6	-23,6
	Cella Casagrande (11 m)	1	-11.17/ -11.13	Anidro (-11,00)	-11,18/-11,12	-11,13/ -11,19	-11,12/ -11,11	Anidro (-11,00)	-11,11/ -11,16
	Cella Casagrande (28 m)	2b	-24.00/ -23.77	-26,81/ -23,84	-23,68/-23,70	-27,60/ bloccato (19m)	-23,69/ bloccato (19m)	-23,59/ -23,59	-23,59/ -23,59
13S10	Tubo Aperto (0-10 m)	-----	-6,03	-6,34	-6,8	-6,2	-6,16	-6,89	-6,43

Come detto dianzi, nella Tabella 2.13 sono stati riportati dati relativi a celle piezometriche di Casagrande, o tubazioni inclinometriche, installate da APOGEO. Si fa però presente che tale tabella non riporta i dati rilevati dalle celle di tipo elettrico installate alle maggiori profondità nell'Unità 3 (profondità di 50 m nel C1p, 38.5 m nel C4p, 40 m nel C7p, 38.2 m nel C8p, 48.5 m nel C11p, 35.1 m nel C14p), in quanto tale rilievo è stato continuo, per cui i suoi risultati sono illustrati nella Figura 2.23 (solo i primi tre dati fanno riferimento ad una fase in cui il rilievo non era ancora continuo). Le celle di Casagrande i cui dati sono riportati nella tabella invece risultano installate sempre all'interno dell'Unità 2.

Tabella 2.13 Tabella riassuntiva delle verticali piezometriche ed inclinometriche, realizzate nell'ambito della campagna geognostica eseguita dalla ditta Apogeo s.r.l., sede del monitoraggio della profondità da piano campagna del livello piezometrico rispetto al piano campagna.

SONDAGGIO	**CELLA CASAGRANDE**	**INCLINOMETRI**	**Unità**	**Misura 0**	**Misura 1**	**Misura 1bis**	**Misura 2**	**Misura 3**	**Misura 4**	**Misura 5**
				del 22-26/02/21	**del 16-18/06/21**	**del 30-31/07-01/08/21**	**del 16-19/10/21**	**del 22-25/02/22**	**del 20-25/07/22**	**del 28-29/11/22 02-03/12/22**
	Prof. (m)	**Prof. (m)**		**(m da p.c.)**	**(m da p.c.)**	**(m da p.c.)**	**(m da p.c.)**	**(m da p.c.)**	**(m da p.c.)**	**(m da p.c.)**
C1p	26,5	--------	2b	anidro	anidro	anidro	anidro	anidro	anidro	anidro
C2i	--------	50	-----	-26,83	-26,52	-26,49	-26,78	26.98	27.00	27.51
C3di	--------	50	-----	-23,79	-25,1	Elimin	Elimin	Elimin	Elimin	Elimin
C3di-bis	--------	46	-----	-26.32 (*)	-25,78	-25,55	-24,99	-25.17	-25.11	-25.38
C4p	18,5	--------	2a fine	anidro	anidro	anidro	anidro	anidro	anidro	anidro
D4i	--------	50	-----	-24,46	-24,46	----	-24,41	-24.28	-24.38	-24.41
C5i	--------	50	-----	-14,97	-14,85	----	-14,96	-12.83	-14.67	-14.7
C6i	--------	50	-----	-23,39	-23,4	----	-23,3	-23.25	-23.34	-23.31
C7p	20,5	--------	3	-11.18/ -11.18	-10,89/ -10,89	-10,92/ -10,92	-11,15	-10.82/ -10.82	-10.70/ -10.82	-10.90/ -10.90
D7i	--------	50	-----	-11,76	-11,57	-11,65	-11,65	-11.49	-11.4	-11.61
C8p	19,5	--------	2a	anidro	anidro	anidro	anidro	anidro	anidro	anidro
D8i	--------	50	-----	-24,31	-24,07	-----	-24,01	-24.25	-23.76	-23.77

C9i	--------	50	-----	-19,43	-19,42	-19,41	-19,45	-19.47	-19.15	-19.2
C10i	--------	60	-----	-16,5	-16,49	-----	-16,5	-16.52	-16.55	-16.59
C11p	23,5	--------	3	-7.17/ -7.16	-7,14/ -7,14	-7,22/ -7,23	-7,53/ -7,51	-7.15/ -7.51	-7.00/ -7.00	-7.12/ -7.13
D11di	--------	70	-----	-6,83	-6,71	-6,54	-7,3	-6.61	-6.45	-6.56
C12i	--------	70	-----	-3,04	-2,56	-----	-2,83	-0.2	-0.97	-1.16
C13i	--------	60	-----	-9,48	-8,2	-----	-7,93	-8.02	-7.78	-7.95
C14p	18,8	--------	2b	-15.63/ -15.63	-15,50/ -15,50	-15,50/ -15,49	-15,56/ -15,56	-15.39/ -15.39	-18.98/ - 19.05	-18.03/ -18.55
C14i	--------	50	-----	-16,73	-15,65	-15,42	-15,46	-15.37	-15.45	-15.51
C15i	--------	70	-----	-9,58	-9,36	-9,34	-9,52	-9.4	-9.27	-9.5
D16i	--------	50	-----	-23,66	-23,58	-23,36	-23,32	-23.2	-23.06	-23.04

I livelli piezometrici misurati in corrispondenza delle celle elettriche consentono di inquadrare il regime nell'Unità 3, che è risultato coerente con quello inquadrato in base ai dati misurati tramite le celle di tipo Casagrande collocate a minore profondità (Tabella 2.13), sia sotto falda, tra 20 e 25 m da p.c., sia sopra il pelo libero della falda, come le celle di Casagrande nei sondaggi: C1p, C4p e C8p (sopra falda durante tutto il periodo di osservazione, da Febbraio 2021 ad oggi; Tabella 2.13). Infatti, come già descritto nella I Relazione di II Fase, anche lungo tali verticali alle celle elettriche profonde corrispondono livelli piezometrici che non raggiungono la quota delle celle Casagrande risultate anidre. Diversamente, lungo le verticali C7p, C11p, e C14p anche le celle di Casagrande, meno profonde, risultano sottofalda e registrano una pressione positiva dell'acqua.

Sia la cella piezometrica posizionata lungo la verticale C7p, che quella posizionata lungo la verticale C11p, risultano sede di livelli piezometrici uguali a quelli presentati nella I Relazione di II Fase. Per la cella Casagrande posizionata lungo la verticale C14p a 25m di profondità, invece, si è riscontrata una diminuzione del livello piezometrico di circa 3 metri nelle ultime due letture. Al contempo però, più in profondità lungo la stessa verticale non si è riscontrata alcuna variazione del livello rilevato dal piezometro elettrico (profondità 35.1 m), come mostrato in Figura 2.23. Pertanto, per questa verticale il regime di filtrazione appare essersi modificato rispetto a quanto descritto nella I Relazione di II Fase, in cui si era riscontrato un regime di filtrazione caratterizzato da una componente verticale dall'alto verso il basso non nulla, mentre le ultime due letture appaiono indicare un flusso di filtrazione con componente verticale pressoché nulla, dato che il livello monitorato nella cella elettrica profonda (livello da p.c. pari a 18.3 m) è praticamente coincidente con quello registrato nella cella Casagrande. Va notato come il livello del pelo libero all'interno del tubo inclinometrico

C14i, posizionato nella stessa zona del C14p, si discosti dal quadro piezometrico rilevato dalle celle piezometriche lungo la verticale C14p, a riprova dell'incertezza che caratterizza i livelli rilevati nelle tubazioni inclinometriche che, quindi, vanno presi in considerazione solo se in prima approssimazione coerenti con l'inquadramento derivabile dalle misure condotte tramite le celle piezometriche, o di Casagrande, o elettriche. Si segnala inoltre un aumento transitorio del livello piezometrico in profondità lungo la verticale C1p, testimoniato dalla misura della cella elettrica ivi collocata, per cui, all'incirca in data 6/11/2022, si è rilevato un livello superiore ai precedenti di circa 1m. Tale aumento piezometrico, però, si è ridotto successivamente di circa mezzo metro. La cella Casagrande meno profonda, però, non da evidenza di alcuna variazione. Ulteriori monitoraggi in futuro potranno, auspicabilmente, fornire ulteriori dati indicativi delle origini di tali variazioni.

In sintesi, l'intera banca dati relativa all'assetto piezometrico nel versante non fa inquadrare fluttuazioni piezometriche di alcun rilievo e potenzialmente correlabili al clima. Si deve però ricordare che il monitoraggio non ha contemplato il rilevo delle suzioni sopra falda, la cui variabilità nel tempo non è caratterizzabile con tale banca dati.

I livelli piezometrici sin qui discussi, ad integrazione dell'ampio bagaglio di misure rilevate anche nei pozzi presenti nel versante (Figura 5.4.5 e Tabella 5.2.1, della I Relazione di II Fase), consente di confermare quanto riportato nella I Relazione di II Fase circa il regime di filtrazione nel versante occidentale del promontorio. In sintesi, tale regime, caratterizzato da sostanziale stazionarietà nelle unità profonde, comporta un flusso nel promontorio di Chieuti a direzione principale SE-NO, ossia con componente ortogonale alle sezioni longitudinali che attraversano il versante occidentale oggetto di studio secondo la massima pendenza (con al piede i torrenti che alimentano il Fosso del Fico). Poiché l'alimentazione tridimensionale di tale versante è veicolata dai livelli profondi, e non solo dall'infiltrazione a piano campagna sul versante, lungo sezioni del tipo C o D nelle Figure 1.62 e 1.63 (§1.5) si deve poter contemplare che il flusso abbia anche una componente ortogonale alla sezione, in profondità.

Tutti i dati qui discussi, unitamente a quelli più approfonditamente dettagliati nel capitolo 8 della I Relazione di II Fase, consentirebbero di ritenere che la superficie libera della falda si collochi poco al di sopra del contatto litostratigrafico tra la sub-Unità2a e la sub-Unità2b (§8.1 I Relazione di II Fase). La sub-Unità 2a parrebbe pertanto essere per la maggior parte del suo spessore, e per la maggior parte del tempo durante l'anno, in condizioni di parziale saturazione. Tuttavia, come dettagliato nella sezione 3.4 del presente capitolo, se si considerano i valori di suzione dedotti per alcuni campioni indisturbati afferenti alla sub-Unità 2b (sulla base delle curve di ritenzione delle diverse unità, ed alla luce del grado di saturazione Sr misurato per i campioni della sub-Unità 2b), si ritiene di dover considerare questa sub-Unità non sempre completamente sommersa. È dirimente precisare, dunque, che il pelo libero della falda, per quanto sembrerebbe collocarsi spesso al di sopra del succitato contatto litostratigrafico, vada considerato a luoghi soggiacente a tale contatto. Ciò è plausibile se si considera l'eterogeneità del contatto litostratigrafico, l'ampia variabilità della ritentività dei terreni quando si passa dalle sabbie più fini della parte superiore della sub-Unità 2b a quelle più grossolane della sub-Unità 2a sovrastante, nonchè l'incidenza delle caratteristiche morfologiche del versante, che inevitabilmente

rendono particolarmente articolata la distribuzione piezometrica e dei flussi nelle succitate sub-Unità meno profonde.

L'elaborazione dei dati di pelo libero all'interno dei pozzi (§8.2 I Relazione di II Fase), unitamente alle ricognizioni in situ, hanno consentito, in diversi periodi dell'anno, di attestare la presenza di sorgenti e zone di efflusso dell'acqua a piano campagna in varie zone del pendio (i punti SO ed SE, in Figura 5.2.1 della I Relazione di II Fase), talora lungo il contatto a piano campagna tra unità più permeabili e meno permeabili, ossia la sub-Unità 2a e l'Unità 3, o la sub-Unità 2b e l'Unità 3. Ne è esempio la sorgente Crojo, o le emergenze idriche lungo la scarpata SR0, interamente popolata da canneti indicativi dello sgorgare locale dei flussi sotterranei (zona del versante ove il pelo libero appare intercettare il piano campagna). Quanto riscontrato ha consentito quindi di caratterizzare queste zone di efflusso come sorgenti di contatto, determinate dalla componente di flusso idrico all'interno della sub-Unità 2a che non si infiltra nelle sub-Unità 2b e Unità 3, ma che ha una componente subparallela alla superficie di contatto che sgorga in corrispondenza dell'emersione dello stesso.

Quanto qui detto trova riscontro anche nella presenza di evidenti segni di erosione interna nello strato più grossolano, sub-Unità 2a, ove questo è esposto lungo la scarpata SR0, ove si riscontra la presenza di sabbia erosa e trasportata a valle (Figura 2.22).





Figura 2.22 Foto della zona di efflusso dell'acqua nella zona della scarpata SR0.

Come già accennato il regime piezometrico in profondità nel pendio appare poco o per nulla sensibile alle azioni climatiche su base stagionale. In particolare, il regime piezometrico nella parte sommersa della sub-Unità 2b e nell'Unità 3 non appare sensibile neanche agli eventi climatici sul breve periodo. Tuttavia, come precisato più avanti, si deve prevedere che nella sub-Unità 2b si possano trovare zone sopra falde ove il terreno è in condizione di parziale saturazione ed ove si possono verificare variazioni di suzione anche dell'ordine di diverse decine di kPa al variare del grado di saturazione, per l'interazione terreno-vegetazione-atmosfera.

Non si hanno purtroppo dati utili per poter svolgere valutazioni circa flussi idrici di carattere transitorio nelle porzioni più grossolane dell'Unità 1, o in alcune porzioni della sub-Unità 2a. Questi possono essere alimentati dall'infiltrazione delle acque di pioggia, in forma diffusa lungo il versante, o, forse più intensamente, da una filtrazione sub-superficiale proveniente da Sud.

La caratterizzazione di tali flussi transitori non è di secondaria importanza, poiché può essere veicolata verso il versante occidentale, infiltrarsi nel pendio lungo il piano campagna, e influenzare il regime dei livelli piezometrici anche nelle porzioni non sature del versante, modificandone le suzioni, così incidendo transitoriamente sulle resistenze disponibili nelle unità superficiali. Il tenore di suzione atteso nei terreni sopra falda, non indagato tramite tensiometri, è stato caratterizzato a partire dai valori del grado di saturazione misurato per i terreni dell'Unità 1 e della sub-Unità 2a, come discusso nella sezione seguente.

Nella porzione di piede del versante, nei pressi della verticale C12i, il pelo libero della falda, differentemente da quanto riportato nella I Relazione di II Fase, si attesta ad una profondità da p.c. di circa 1m o meno (praticamente a piano campagna), per cui le argille dell'Unità 3 sono da considerarsi totalmente sature.

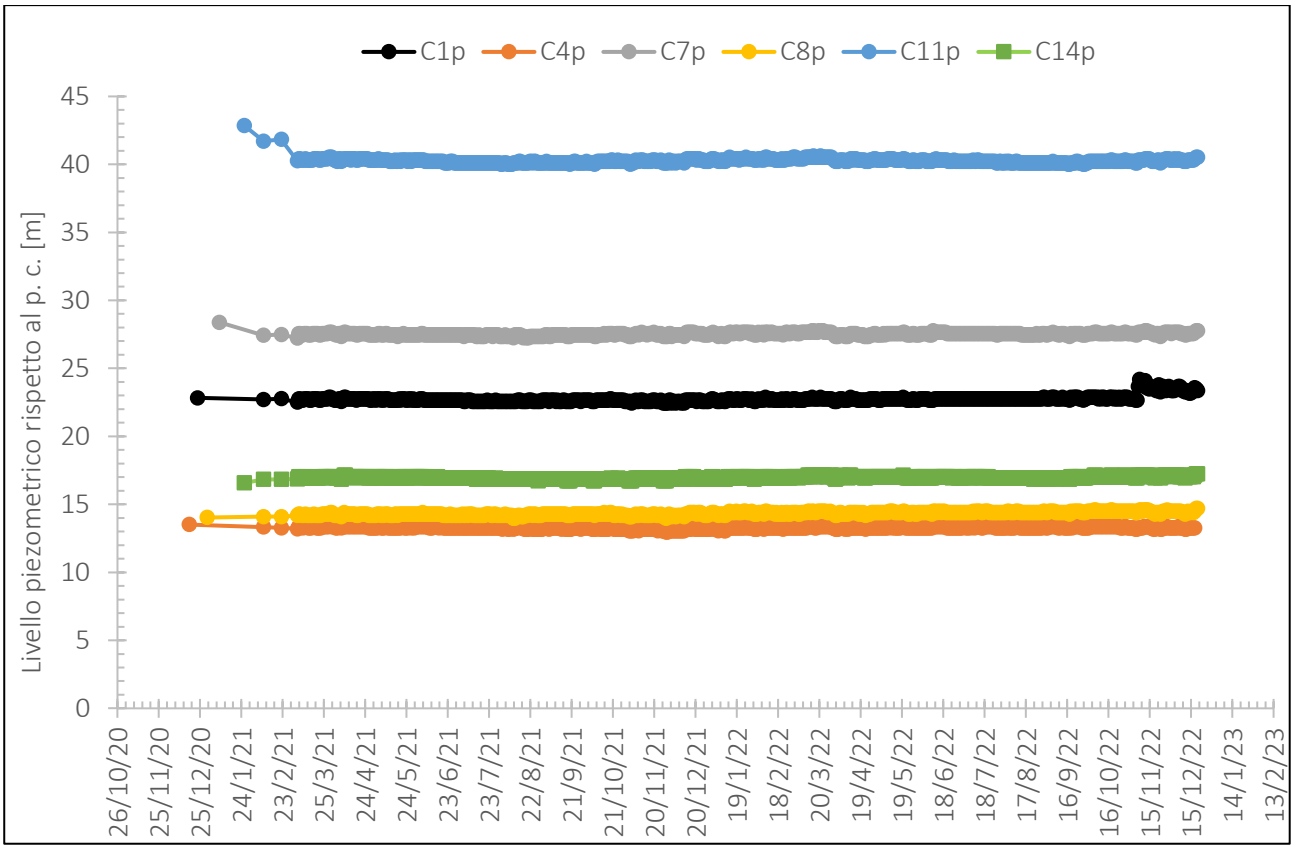


Figura 2.23 - Grafico che riporta l'andamento nel tempo dei livelli piezometrici relativi ai sei piezometri elettrici installati nell'ambito della campagna geognostica eseguita da Apogeo s.r.l., riportati in termini di risalita piezometrica rispetto al piano campagna (a).

3.2 Profili del grado di saturazione S_r con la profondità z

Nel paragrafo 7.2 della I Relazione di II Fase, sono state riportate le proprietà fisiche e i parametri di stato misurati per i campioni prelevati nella campagna geognostica, qui ripetuti nella Tabella 2.14.

Per ciascun campione, del quale si è indicata la profondità di prelievo e l'unità litologica di afferenza, sono stati tracciati i profili delle proprietà con la profondità di prelievo, al fine di valutare l'andamento lungo z, all'interno del versante, dei diversi parametri, tra cui il profilo del grado di saturazione S_r dei campioni (Figura 2.24). I profili sono stati riferiti alla quota assoluta s.l.m. determinata, per ciascuna verticale geognostica, in base alla quota assoluta del boccaforo.

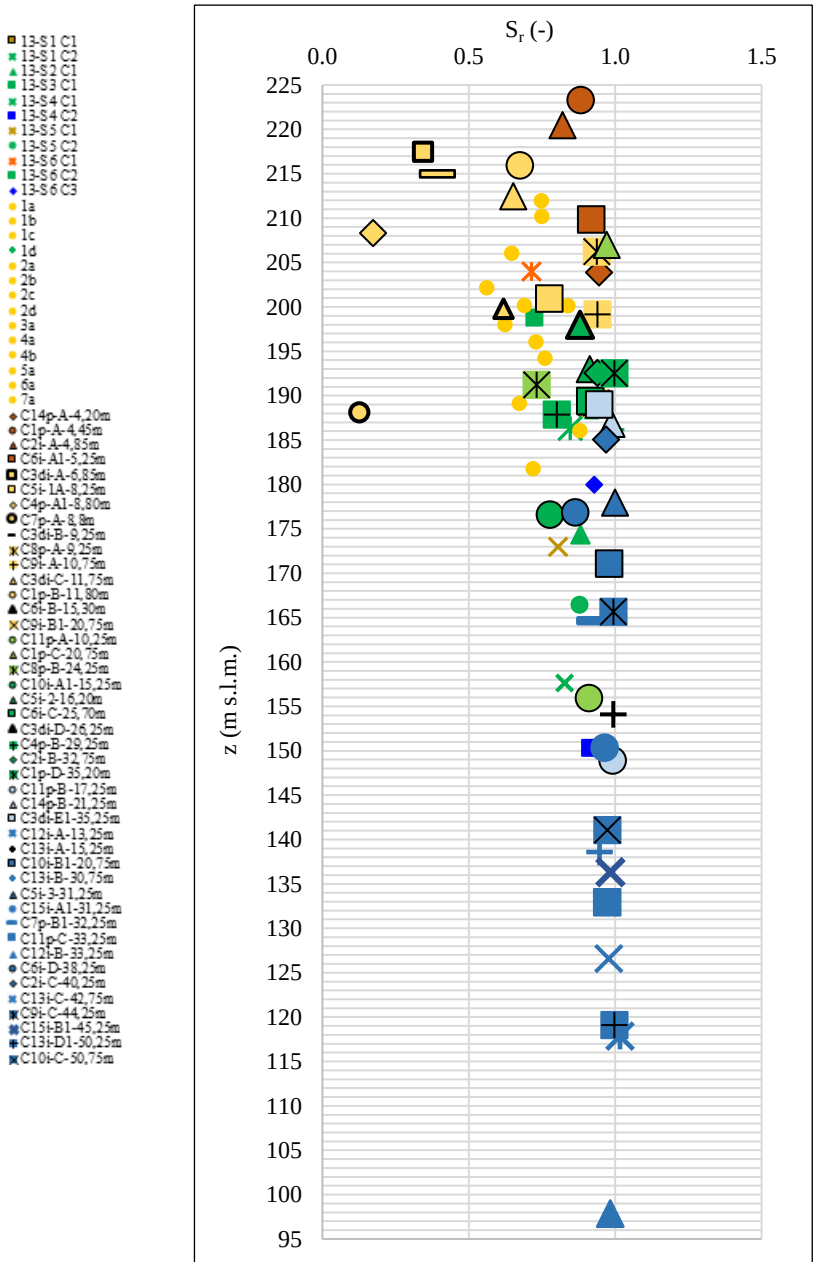


Figura 2.24 Profilo del grado di saturazione Sr con la profondità (quota assoluta) dei campioni indisturbati di Chieuti.

Tabella 2.14 Tabella di sintesi delle proprietà fisiche e indice, parametri di stato e frazioni granulometriche per i campioni indisturbati di tutte le campagne geognostiche: distinzione per unità litologiche (marrone: Unità 1; giallo: sub-Unità 2a; verde: sub-Unità 2b; blu: Unità 3).

Sigla campione	Campagna	z (m)	γ_{nat} (kN/m^3)	γ_s (kN/m^3)	γ_d (kN/m^3)	G_s (-)	w_{nat} (%)	e (-)	n (-)	S_r (-)	CF (%)	MF (%)	SF (%)	GF (%)	LL (%)	PL (%)	IP (%)	IC (-)	A (-)
Unità 1																			
S6-C1	2013	5,00-5,50	18,28	26,45	15,33	2,70	19,22	0.725	0.42	0.71	21,42	17,29	41,26	20,03	43,59	19,98	23, 1	0,71	1,1
C1p-A	2021	4,20-4,70	20,22	27,16	16,87	2,72	19,82	0,610	0,379	0,88	16,75	74,76	6,81	1,68	35,50	18,54	16,95	0,77	1,01
C2i-A	2021	4,70-5,00	18,01	27,28	14,02	2,73	28,43	0,945	0,486	0,82	18,75	8,50	20,86	51,89	72,17	27,88	44,29	0,85	1,42
C6i-A1	2021	5,00-5,50	20,70	27,05	17,43	2,71	18,74	0,552	0,355	0,92	28,76	18,25	30,62	22,36	62,37	22,57	39,79	1,05	1,38
C14p-A	2021	4,00-4,40	20,53	26,92	17,08	2,69	20,23	0,576	0,366	0,95	27,77	62,21	9,97	0,00	44,97	22,78	22,19	1,06	0,80
Unità 2a																			
1a	1986	10,0-10,4	19,83	26,36	17,30	2,69	14,62	0,524	0,344	0,750	0,00	2,02	97,98	0,00	-	-	-	-	-
1b	1986	20,0-20,4	20,04	26,38	17,85	2,69	12,27	0,478	0,323	0,690	0,00	3,87	91,28	4,84	-	-	-	-	-
1c	1986	26,0-26,3	19,15	26,34	16,31	2,69	17,42	0,615	0,381	0,761	0,00	8,97	91,03	0,00	-	-	-	-	-
2a	1986	10,0-10,3	20,32	26,41	18,71	2,69	8,57	0,411	0,291	0,562	0,00	6,82	93,18	0,00	-	-	-	-	-
2c	1986	23,0-23,3	20,67	26,34	18,77	2,69	10,10	0,403	0,287	0,673	0,00	3,28	64,63	32,09	-	-	-	-	-
2d	1986	26,0-26,4	18,77	26,48	15,04	2,70	24,79	0,761	0,432	0,879	0,00	6,01	82,07	11,93	-	-	-	-	-
3a	1986	9,0-9,4	19,00	25,48	16,28	2,60	16,72	0,580	0,367	0,749	0,00	1,92	98,08	0,00	-	-	-	-	-
4a	1986	11,0-11,4	19,92	25,46	18,00	2,60	10,72	0,430	0,301	0,647	0,00	9,64	90,36	0,00	-	-	-	-	-
4b	1986	21,0-21,4	20,34	25,35	18,14	2,58	12,09	0,428	0,300	0,730	0,00	14,64	63,66	21,70	-	-	-	-	-
5a	1986	11,0-11,4	19,62	24,81	17,72	2,53	10,74	0,435	0,303	0,624	0,00	8,62	91,38	0,00	-	-	-	-	-
6a	1986	15,0-15,4	18,55	25,23	14,24	2,57	30,24	0,927	0,481	0,839	0,00	13,97	86,03	0,00	-	-	-	-	-
7a	1986	8,0-8,4	19,54	21,43	16,60	2,185	17,72	0,538	0,350	0,720	0,00	12,12	87,88	0,00	-	-	-	-	-
S1-C1	2013	20,40-20,90	19,83	26,36	14,88	2,67	25,64	0,762	0,432	0,90	49,79	44,28	5,43	0,50	72,39	33,21	39,18	1,120	0,79
S5-C1	2013	2.80-3.20	19,00	27,27	15,63	2,78	21,58	0,745	0,427	0,80	13,42	43,61	39,92	3,05	32,91	21,74	11,17	0,547	0,83
C1p-B	2021	11,6-12,00	18,88	27,02	16,17	2,70	16,76	0,670	0,401	0,68	3,61	11,13	84,66	0,60	-	-	-	-	-
C3di-A	2021	6,50-7,00	17,37	26,65	15,99	2,67	8,61	0,667	0,400	0,34	7,25	15,63	53,60	23,52	25,25	14,05	11,21	0,02	1,39
C3di-B	2021	9,00-9,50	16,84	26,90	15,12	2,69	11,40	0,779	0,438	0,39	5,86	10,91	82,87	0,36	24,87	22,63	2,24	-1,83	0,38

C3di-C	2021	11,5-12,00	19,79	26,73	17,55	2,67	12,75	0,523	0,343	0,65	11,72	29,15	56,45	2,69	24,42	16,95	7,47	0,65	0,64
C4p-A1	2021	8,60-9,00	15,73	26,64	14,98	2,72	4,96	0,778	0,438	0,17	0,50	3,71	95,79	0,00	-	-	-	-	-
C5i-1A	2021	8,00-8,50	19,54	26,55	16,65	2,65	17,35	0,594	0,373	0,78	2,17	14,70	81,07	2,06	-	-	-	-	-
C6i-B	2021	15,00-15,60	17,62	26,27	14,98	2,68	17,41	0,754	0,430	0,62	5,79	20,77	71,42	2,02	-	-	-	-	-
C7p-A	2021	8,60-9,00	13,12	26,93	12,44	2,69	5,46	1,164	0,538	0,13	1,72	11,87	86,17	0,24	-	-	-	-	-
C8p-A	2021	9,0-9,50	21,03	27,00	17,85	2,70	17,80	0,513	0,339	0,94	6,09	20,61	72,78	0,52	-	-	-	-	-
C9i-A	2021	10,50-11,00	20,61	26,92	17,23	2,69	19,62	0,562	0,360	0,94	4,15	57,09	38,76	0,00	29,65	24,34	5,30	1,65	1,28
C9i-B1	2021	20,5-21,00	19,63	27,00	15,72	2,70	24,85	0,718	0,418	0,94	6,37	25,26	65,73	2,63	-	-	-	-	-
Unità 2b																			
1d	1987	34.0-34.4	20,70	26,40	17,00	2,69	21,74	0,553	0,356	1,000	0,00	45,12	54,88	0,00	34,20	22,70	11,50	1,084	-
S1-C2	2013	22.50-23.00	18,44	27,08	14,61	2,76	26,18	0,853	0,460	0,847	24,05	49,96	25,70	0,29	-	-	-	-	-
S2-C1	2013	17.30-17.80	19,24	27,39	15,48	2,79	24,31	0,770	0,435	0,882	20,86	52,01	27,13	0,00	-	-	-	-	-
S3-C1	2013	22.60-23.00	17,51	27,68	14,00	2,82	25,09	0,977	0,494	0,724	11,98	48,80	39,19	0,03	52,98	23,28	29,7	0,617	2,48
S4-C1	2013	21.20-21.70	18,71	27,28	15,08	2,78	24,09	0,809	0,447	0,828	16,09	36,82	44,96	2,13	38,22	23,13	15,09	0,604	0,94
S5-C2	2013	9.30-9.80	18,52	26,64	14,64	2,72	26,50	0,820	0,450	0,878	16,54	48,93	34,53	0,00	39,47	21,85	17,62	0,527	1,07
S6-C2	2013	20.80-21.30	19,23	26,90	15,36	2,74	25,23	0,752	0,429	0,920	21,84	40,45	37,71	0,00	36,11	20,75	15,36	0,566	0,70
C1p-C	2021	20,50-21,00	19,68	27,29	15,47	2,73	27,17	0,763	0,433	0,97	21,54	69,73	8,67	0,06	48,62	27,53	21,10	0,98	0,98
C1p-D	2021	35,00-35,40	20,52	26,75	16,82	2,68	22,03	0,591	0,371	1,00	9,16	29,32	50,51	15,05	27,48	24,17	3,31	1,63	0,32
C2i-B	2021	32,50-33,00	20,40	27,10	16,85	2,71	21,08	0,608	0,378	0,94	16,19	40,01	43,80	0,00	33,71	19,96	13,75	0,82	0,85
C3di-D	2021	26,00-26,50	20,48	27,04	17,32	2,70	18,28	0,561	0,360	0,88	21,56	39,72	35,15	3,56	41,69	22,05	19,64	1,07	0,91
C4p-B	2021	29,00-29,50	18,19	26,80	14,52	2,68	25,25	0,845	0,458	0,80	10,68	25,3	64,0	0,0	28,13	25,48	2,65	-1,29	0,25
C5i-2	2021	16,00-16,40	19,61	26,90	15,87	2,69	23,59	0,695	0,410	0,91	17,28	37,95	39,71	5,06	31,34	20,64	10,70	0,51	0,62
C6i-C	2021	25,50-25,90	19,26	26,93	15,30	2,69	25,85	0,760	0,432	0,92	16,65	40,3	43,1	0,0	36,09	21,71	14,39	0,55	0,86
C8p-B	2021	24,0-24,50	18,85	26,98	15,82	2,70	19,14	0,706	0,414	0,73	8,00	28,30	60,94	2,40	-	-	-	-	-
C9i-B2	2021	24,0-24,50	-	-	-	-	-	-	-	-	27,65	36,45	35,40	0,50	-	-	-	-	-
C10i-A1	2021	15,00-15,50	18,81	26,95	15,51	2,69	21,29	0,738	0,425	0,78	16,02	47,26	36,72	0,00	34,27	21,39	12,88	0,53	0,80
C11p-A	2021	10,00-10,50	18,78	26,74	14,66	2,67	28,08	0,824	0,452	0,91	15,91	31,98	51,91	0,20	38,48	23,62	14,86	0,52	0,93
Unità 3																			
S4-C2	2013	28.50-29.00	19,26	26,59	15,53	2,71	24,04	0,712	0,416	0,915	20,35	60,74	17,80	1,10	34,88	18,95	15,93	0,540	0,78

S6-C3	2013	29.00-29.50	19,41	26,76	15,62	2,73	24,29	0,714	0,416	0,929	10,69	32,90	56,41	0,00	30,80	19,22	11,58	0,401	1,08
C2i- C	2021	40,00-40,50	20,59	27,11	16,96	2,71	21,39	0,598	0,374	0,97	16,68	42,16	41,16	0,00	31,39	21,13	10,26	0,91	0,62
C3di-E1	2021	35,00-35,50	20,43	27,26	16,79	2,73	21,63	0,623	0,384	0,95	19,50	57,47	23,03	0,00	39,55	21,88	17,67	0,94	0,91
C5i-3	2021	31,00-31,50	20,18	27,22	16,09	2,72	25,42	0,692	0,409	1,00	8,16	34,35	57,33	0,15	31,26	20,81	10,45	0,56	1,28
C6i-D	2021	38,00-38,50	18,67	27,14	14,72	2,71	26,87	0,844	0,458	0,86	5,07	23,33	71,46	0,13	-	-	-	-	-
C7p-B1	2021	32,00-32,50	20,32	27,35	16,73	2,73	21,42	0,634	0,388	0,92	16,55	50,52	32,93	0,00	36,99	20,35	16,64	0,83	1,01
C9i-C	2021	44,00-44,50	20,74	27,20	17,02	2,72	21,87	0,598	0,374	0,99	25,99	51,35	22,65	0,00	40,62	20,29	20,33	0,92	0,78
C10i-B1	2021	20,5-21,00	20,76	27,04	17,19	2,70	20,77	0,573	0,364	0,98	17,38	49,51	33,11	0,00	35,61	20,67	14,95	0,96	0,86
C10i-C	2021	50,50-51,00	20,79	27,55	17,09	2,75	21,62	0,612	0,380	0,97	38,80	53,83	7,37	0,00	51,25	22,49	28,76	1,01	0,74
C11p-B	2021	17,00-17,50	20,6	27,41	16,72	2,74	23,16	0,640	0,390	0,99	12,88	40,33	46,78	0,00	34,36	19,67	14,69	0,75	1,14
C11p-C	2021	33,00-33,50	20,67	27,27	17,01	2,73	21,54	0,603	0,376	0,97	23,81	55,17	20,84	0,18	37,91	20,15	17,76	0,89	0,75
C12i-A	2021	13,00-13,50	20,87	27,01	17,16	2,70	21,60	0,574	0,365	1,02	19,83	58,57	21,61	0,00	39,32	20,81	18,51	0,98	0,93
C12i-B	2021	33,00-33,50	21,01	27,43	17,41	2,74	20,63	0,575	0,365	0,98	32,07	57,08	10,86	0,00	47,88	21,87	26,01	1,03	0,81
C13i-A	2021	15,00-15,50	20,57	27,28	16,73	2,73	22,97	0,631	0,387	0,99	24,08	54,25	21,67	0,00	40,01	20,87	19,14	0,88	0,79
C13i-B	2021	30,50-31,00	20,47	27,29	16,84	2,73	21,51	0,620	0,383	0,95	25,40	52,3	22,3	0,0	40,69	21,32	19,37	0,93	0,76
C13i-C	2021	42,50-43,00	20,99	27,36	17,44	2,74	20,34	0,569	0,363	0,98	26,79	54,53	18,68	0,00	40,98	20,21	20,77	0,97	0,78
C13i-D1	2021	50,00-50,50	21,19	27,36	17,64	2,74	20,09	0,551	0,355	1,00	21,60	56,80	21,50	0,00	38,75	19,13	19,62	0,95	0,91
C14p-B	2021	21,00-21,50	20,51	27,18	16,70	2,72	22,79	0,627	0,385	0,988	22,70	52,40	24,90	0,00	38,47	19,75	18,72	0,82	0,82
C15i-A1	2021	31,00-31,50	20,41	27,04	16,73	2,70	21,98	0,616	0,381	0,96	14,61	45,31	40,08	0,00	31,38	19,57	11,81	0,73	0,81
C15i-B1	2021	45,00-45,50	20,36	27,42	16,41	2,74	24,07	0,671	0,401	0,98	42,55	52,02	5,43	0,00	54,44	24,48	29,96	1,00	0,70

I valori del grado di saturazione, S_r, si rivelano, come rappresentato in Figura 2.24:

- relativamente poco dispersi per i campioni dell'Unità 1, con $0.71 < S_r < 0.95$;
- abbastanza dispersi per i campioni della sub-Unità 2a, in un intervallo $0.13 < S_r < 0.94$;
- abbastanza elevati per i campioni della sub-Unità 2b, $0.722 < S_r < 1$;
- elevati, prossimi all'unità, per i campioni dell'Unità 3 che, eccezion fatta per il campione più grossolano C6i-D con $S_r=0.86$ a circa 177 m s.l.m., presentano tutti $S_r>0.9$ con il variare della z.

Val la pena evidenziare che, però, i gradi di saturazione caratterizzati nella campagna di indagine e diagrammati nella Figura 2.24 rappresentano il grado di saturazione dei terreni in inverno, ossia quando i campioni sono stati prelevati. Ove, sulla base della ricostruzione dell'assetto piezometrico del versante si può ritenere che i campioni prelevati in profondità, ossia tutti quelli afferenti all'Unità 3, siano sommersi in situ cosa che vale anche per molti dei campioni della sub-Unità 2b nella parte di valle del versante; per i campioni della parte superiore della sub-Unità 2b, della sub-Unità 2a e dell'Unità 1 si deve contemplare che i gradi di saturazione in Figura 2.24 siano quelli quasi massimi nell'anno, potendo ridursi in primavera-estate.

3.3 Caratterizzazione idraulica dei litotipi

La caratterizzazione idraulica è stata svolta sia mediante misure di laboratorio, già presentate nel Capitolo 7 della I Relazione di II Fase (§7.4), sia tramite prove in situ, presentate nel Capitolo 8 (§8.1) della stessa relazione. Nello specifico, sono state effettuate misure di permeabilità diretta, eseguite in laboratorio mediante permeametro, e prove di permeabilità in situ a carico variabile in foro, secondo la procedura LeFranc.

3.3.1 Misure di permeabilità satura di laboratorio

In Figura 2.25 sono illustrati i risultati delle misure di permeabilità diretta attraverso prove eseguite a carico variabile (cv) o a carico costante (cc).

I campioni testati afferiscono, come si evince dalla Tabella 2.15, all'Unità 1, alle sub-Unità 2a e 2b, mentre per l'Unità 3, considerata la sua composizione prevalentemente fine e attesa una bassa permeabilità, si sono condotte unicamente misure di permeabilità in situ.

Le prove di laboratorio hanno restituito per:

- l'Unità 1, $3.26\cdot10^{-11}$ m/s< k <$4.22\cdot10^{-10}$ m/s, rivelandone una bassa permeabilità;
- la sub-Unità 2a, $4.73\cdot10^{-10}$ m/s< k <$3.25\cdot10^{-7}$ m/s, rivelandone un intervallo abbastanza ampio dei valori, coerentemente con la natura granulometrica eterogenea dei litotipi ivi presenti che, in corrispondenza di una componente prevalentemente sabbiosa, esibiscono valori di *k* più elevati;
- la sub-Unità 2b, $1.05\cdot10^{-9}$ m/s< k <$2.47\cdot10^{-7}$m/s, con valori di *k* che coprono un intervallo piuttosto ampio.

I risultati ottenuti in laboratorio sono stati poi integrati con quelli ottenuti mediante prove di permeabilità in situ, richiamati nel seguito.

Tabella 2.15 Proprietà iniziali dei campioni sottoposti a misura di permeabilità in permeametro e valore di conducibilità idraulica misurato.

Sigla campione	**Unità**	**z da pc**	**z slm**	**Provino**	**w_0**	**e_0**	**S_r**	**CF**	**MF**	**SF**	**GF**	**Prova**	**k_{sat}**
		m	**m**	**-**	**%**	**-**	**%**	**%**	**%**	**%**	**%**		**m/s**
C1p-A	1	4,45	223,3	1	23,22	0,70	90,15	16,75	74,76	6,81	1,68	cv	3,19E-10
C2i-A	1	4,85	220,5	1	23,65	0,856	75,34	18,43	8,79	20,86	51,91	cv	3,26E-11
C6i-A1	1	5,25	209,8	1	18,21	0,628	78,41	28,76	18,25	30,62	22,36	cv	1,65E-10
C14p-A	1	4,20	203,9	1	22,69	0,64	95,07	27,77	62,21	9,97	0,00	cv	4,22E-10
C1p-B	2a	11,80	215,9	1	21,53	0,723	80,46	3,61	11,13	84,66	0,60	cc	3,25E-07
C3di-A	2a	6,85	217,4	1	14,36	0,798	47,97	6,95	15,93	53,60	23,52	cv	9,18E-09
C3di-B	2a	9,25	215,0	1	15,56	0,845	49,57	5,90	10,90	82,90	0,40	cv	1,53E-08
C3di-C	2a	11,75	212,5	1	12,14	0,517	62,76	11,72	29,15	56,45	2,69	cv	9,39E-10
C5i-1A	2a	8,25	201,0	1	28,25	0,842	89,07	2,17	14,70	81,07	2,06	cv	1,54E-07
C6i-B	2a	15,30	199,8	1	18,09	0,762	63,58	5,79	20,77	71,42	2,02	cv	3,13E-08
C8p-A	2a	9,25	206,2	1	12,75	0,415	82,95	6,09	20,61	72,78	0,52	cv	1,01E-08
C9i-A	2a	10,75	199,2	1	20,69	0,567	98,19	4,15	57,09	38,76	0,00	cv	4,73E-10
C9i-B1	2a	20,75	189,2	1	20,60	0,64	86,27	6,37	25,26	65,73	2,63	cv	7,56E-08
												cc	9,84E-08
				2	16,91	0,48	96,12					cv	6,21E-09
												cc	1,15E-08
C1p-C	2b	20,75	207,0	1	23,85	0,69	94,65	21,50	69,70	8,70	0,10	cv	1,05E-09
C5i-2	2b	16,20	193,0	1	22,45	0,937	64,59	17,28	37,95	39,71	5,06	cv	2,47E-07
C11p-A	2b	10,25	155,9	1	31,35	0,900	93,16	15,90	32,00	51,90	0,20	cv	6,55E-09

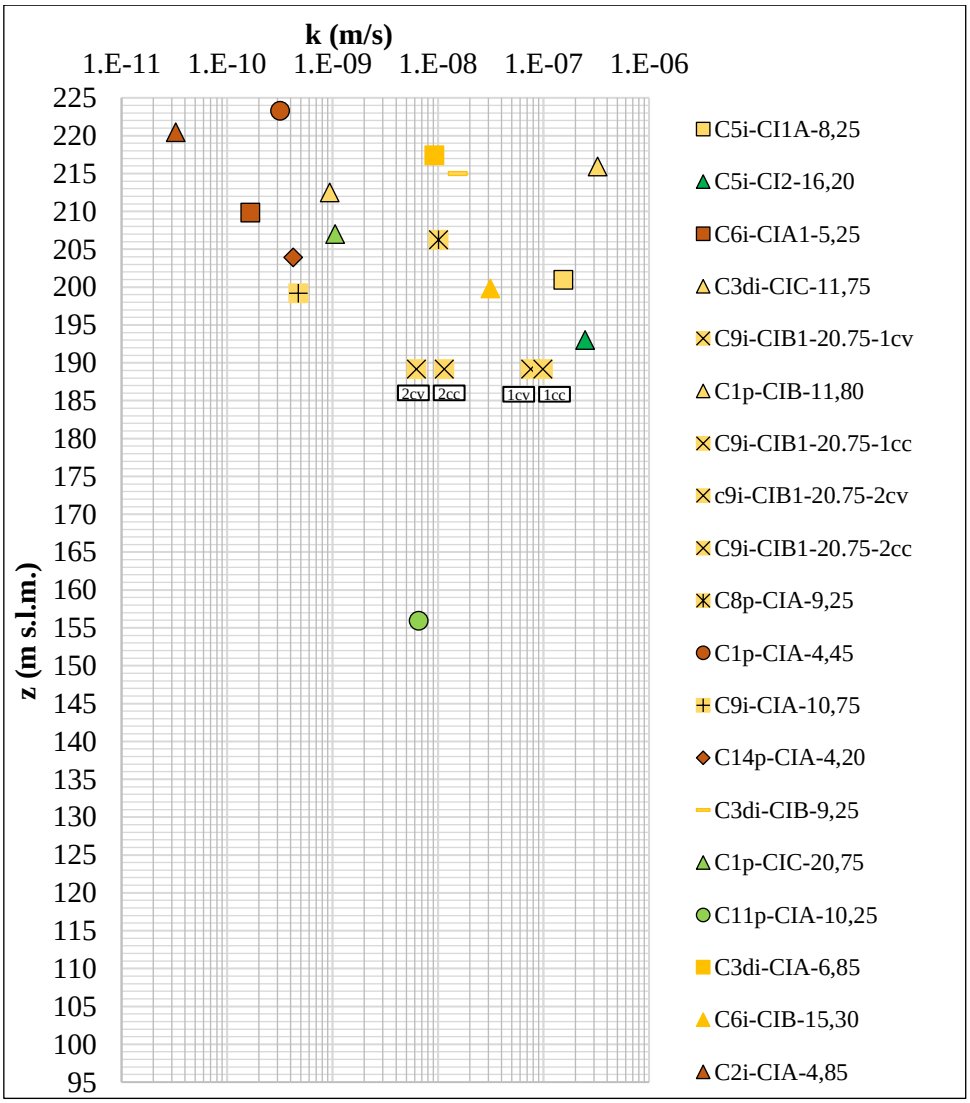


Figura 2.25 Profilo dei valori di conducibilità idraulica k misurati in laboratorio con la profondità (quota assoluta).

3.3.2 Misure di permeabilità satura in situ e comportamento idraulico in condizioni di parziale saturazione

Quanto alle prove in situ, come dettagliato nel Capitolo 8 della I Relazione di II Fase, le prove di permeabilità a carico variabile in foro secondo la procedura LeFranc hanno permesso di determinare la permeabilità satura dei terreni per come essi sono eterogenei, in natura e stato, ed eventualmente interessati dalla fessurazione, a scala di sito.

I risultati di tutte le prove di permeabilità a carico variabile svolte in situ da Apogeo s.r.l., sono riportati nell'All. AP03 della I Relazione di II Fase.

I valori del coefficiente di permeabilità satura per ogni unità, e dunque le funzioni di conducibilità idraulica al variare del grado di saturazione (dunque al variare della suzione) a partire dalla condizione satura, sono stati desunti tramite una back-analysis numerica delle prove in foro LeFranc (Capitolo 8 della I Relazione di II Fase).

Come è possibile evincere dalla Figura 2.26, la back-analysis delle prove LeFranc ha in media restituito, a parità di quota sul livello medio del mare, valori della permeabilità satura per i diversi litotipi leggermente inferiori rispetto a quelli determinati in laboratorio. Ciò è valso sia per la permeabilità satura dell'Unità 1 e della sub-Unità 2b, che, in parte, per la sub-Unità 2a, mentre non è possibile esprimersi sull'Unità 3, per la quale non sono disponibili misure in laboratorio della permeabilità satura.

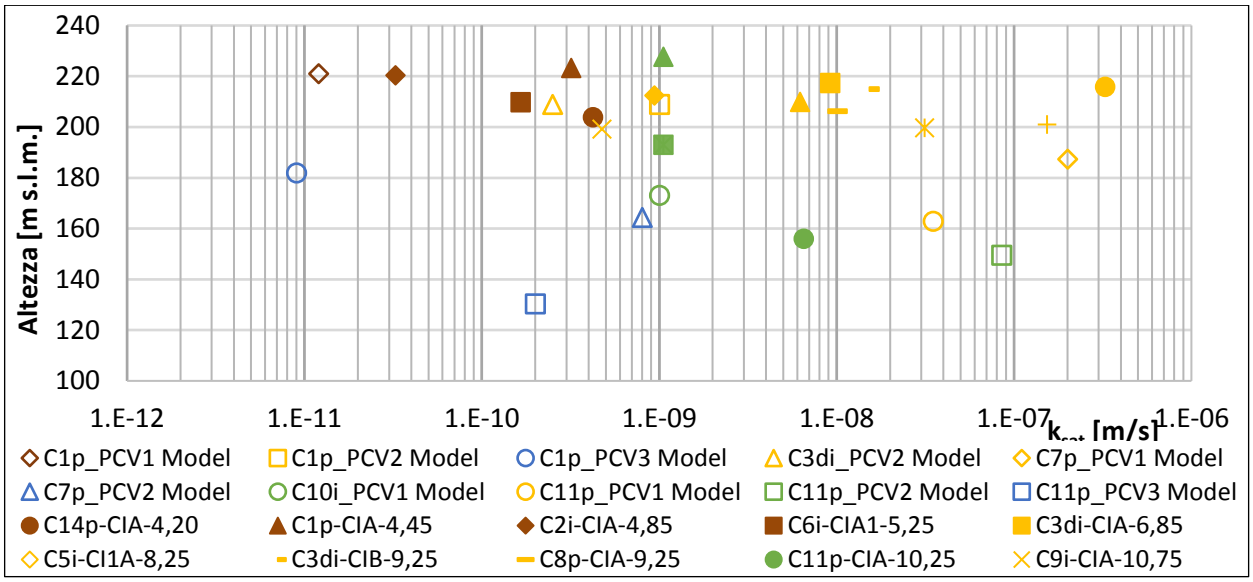


Figura 2.26 Confronto tra i coefficienti di permeabilità satura misurati in laboratorio (simboli pieni - Capitolo 7 della I R. II Fase) e quelli risultanti dalla back-analysis numerica delle prove LeFranc (simboli vuoti). I colori dei simboli sono coerenti con l'unità litostratigrafica di appartenenza.

La discordanza osservata tra i dati delle prove di laboratorio ed i risultati delle back-analysis delle prove LeFranc si ritiene possa essere attribuita alla diversa rappresentatività delle prove di sito e di laboratorio.

Entrambe le tecniche di misura (ovvero prove di laboratorio e back-analyses numeriche) danno però evidenza dell'ampio range di variabilità dei valori di permeabilità che caratterizzano ogni unità, o sub-unità. I risultati di laboratorio, coerentemente con i dati di back-analysis delle prove LeFranc, sono testimonianza della rilevante disomogeneità idraulica dei materiali che costituiscono il versante occidentale del comune di Chieuti, aspetto che presumibilmente incide sulla filtrazione locale, ma che non potrà essere implementato nelle analisi numeriche della stabilità delle diverse porzioni del versante, in quanto l'eterogeneità non distingue zone delle unità a diversa permeabilità, bensì delinea una variabilità diffusa dei valori di permeabilità, che induce ad omogeneizzare i valori e caratterizzare ogni sub-unità, o unità, con il corrispondente valore medio della permeabilità satura.

Parallelamente all'esecuzione delle prove di permeabilità, nel Laboratorio Geotecnico 'G. Melidoro' del Politecnico di Bari è stata svolta una caratterizzazione del comportamento ritentivo dei diversi litotipi del versante occidentale, in condizioni di parziale saturazione, largamente discussa nella I Relazione di II Fase, ma poi integrata successivamente da nuove misure.

Per ognuna delle Unità 1, sub-Unità 2a e 2b, si è sottoposto un campione a misure di contenuto d'acqua e di suzione nel tempo, al variare della desaturazione in laboratorio, per caratterizzarne la curva di ritenzione. La

misura dei diversi stati di suzione in laboratorio, in prove sia di essiccamento che di umidificazione, è stata effettuata utilizzando tensiometri ad alta capacità dell'Imperial College per suzioni superiori ai 100 kPa, la tecnica della carta filtro per suzioni superiori ai 1500 kPa, mentre si è ricorso all'utilizzo dei tensiometri a bassa capacità per valori di suzione inferiori a 100 kPa (Tabella 2.16).

Tabella 2.16 Parametri di ritenzione rappresentativi delle singole unità.

Sabbia grossolana Unità 2a

Campione	e	w	w %	Sr	Sr %	θw	s(kPa)
C4p.A1 II mis WRC	0,868	0,02317	2,31734	0,07233	7,2332	0,063	11,4
C4p.A1	0,868	0,02152	2,15221	0,06718	6,7178	0,058	13,9
C4p.A1	0,868	0,01987	1,98708	0,06202	6,2024	0,054	14,3
C4p.A1	0,868	0,01822	1,82196	0,05687	5,6869	0,049	16,1
C4p.A1	0,868	0,01657	1,65683	0,05172	5,1715	0,045	18,5
C4p.A1	0,868	0,01492	1,4917	0,04656	4,6561	0,040	19,8
C4p.A1	0,868	0,01327	1,32657	0,04141	4,1407	0,036	25,3
C4p.A1	0,868	0,01161	1,16144	0,03625	3,6252	0,031	54,1
C4p.A1	0,868	0,00996	0,99631	0,0311	3,1098	0,027	56,3
C4p.A1	0,868	0,00996	0,99631	0,0311	3,1098	0,027	116
C4p.A1 III mis WRC	0,815	0,29572	29,5722	0,98663	98,6630	0,443	0,01
C4p.A1	0,815	0,24141	24,1406	0,80541	80,5413	0,362	2
C4p.A1	0,815	0,17929	17,9292	0,59818	59,8180	0,269	3
C4p.A1	0,815	0,14917	14,9169	0,49768	49,7677	0,224	4
C4p.A1 IV mis WRC	0,787	0,28734	28,7343	0,99313	99,3128	0,437	0,01
C4p.A1	0,787	0,24634	24,6339	0,85141	85,1407	0,375	1
C4p.A1	0,787	0,21793	21,7931	0,75322	75,3222	0,332	2

Sabbia fine Unità 2a/2b

Campione	e	w	w %	Sr	Sr %	θw	s(kPa)
C11p.C1A	0,852	0,31923	31,92275	1	100	0,460	0,1
C11p.C1A	0,761	0,28518	28,51758	1	100	0,432	0,1
C11p.C1A	0,761	0,28356	28,35616	0,99434	99,434	0,430	40
C11p.C1A	0,783	0,18262	18,26237	0,62256	62,2559	0,273	73
C11p.C1A	0,703	0,19654	19,65427	0,74609	74,6085	0,308	76
C11p.C1A	0,689	0,11708	11,70768	0,4535	45,3498	0,185	85
C11p.C1A	0,741	0,23549	23,5486	0,84861	84,8611	0,361	85
C11p.C1A	0,632	0,1456	14,55969	0,6155	61,5496	0,238	90
C11p.C1A	0,654	0,09235	9,234617	0,37709	37,7091	0,149	92
C11p.C1A	0,563	0,0289	2,88987	0,13707	13,7066	0,049	1675
C11p.C1A	0,563	0,0289	2,88987	0,13707	13,7066	0,049	19669,02

Argilla Unità 3

Campione	e	w	w %	Sr	Sr %	θw	s(kPa)
Argilla Montemesola	0,612	0,22407	22,407	0,9915	99,147	0,3764	1100
Argilla Montemesola	0,607	0,21485	21,485	0,9579	95,793	0,3620	1298
Argilla Montemesola	0,603	0,20086	20,086	0,9017	90,174	0,3393	1650
Argilla Montemesola	0,603	0,19029	19,029	0,8543	85,427	0,3214	2150
Argilla Montemesola	0,595	0,16332	16,332	0,7435	74,348	0,2773	2370
Argilla Montemesola	0,594	0,13112	13,112	0,5977	59,771	0,2227	4005
Argilla Montemesola	0,591	0,08208	8,208	0,3761	37,606	0,1397	7020
Argilla Montemesola	0,591	0,04728	4,728	0,2167	21,673	0,0805	13160
Argilla Montemesola	0,585	0,03397	3,397	0,1573	15,734	0,0581	23625

Nel grafico in Figura 2.27 sono riportati tutti i dati di ritenzione, θ – s, ove θ è il contenuto d'acqua volumetrico e s la suzione, per come misurati in laboratorio, per l'Unità 1 (punti marroni nel grafico, relativi al campione C1p_CiA e C6i_A1), per la sub-Unità 2a grossolana (punti gialli nel grafico, relativi al campione C4p_A1) e per la sub-Unità 2b (punti verdi nel grafico, relativi al campione C11p_CiA), risultato di una integrazione dei dati elaborati nella I Relazione di II Fase con quelli ottenuti da misure di laboratorio concluse successivamente. Va precisato che per l'Unità 3 (punti blu), in assenza di misure sperimentali, si è assunto che le proprietà ritentive siano simili a quelle dell'argilla di Montemesola, i cui dati sperimentali sono disponibili in letteratura (Cafaro and Cotecchia, 2015).

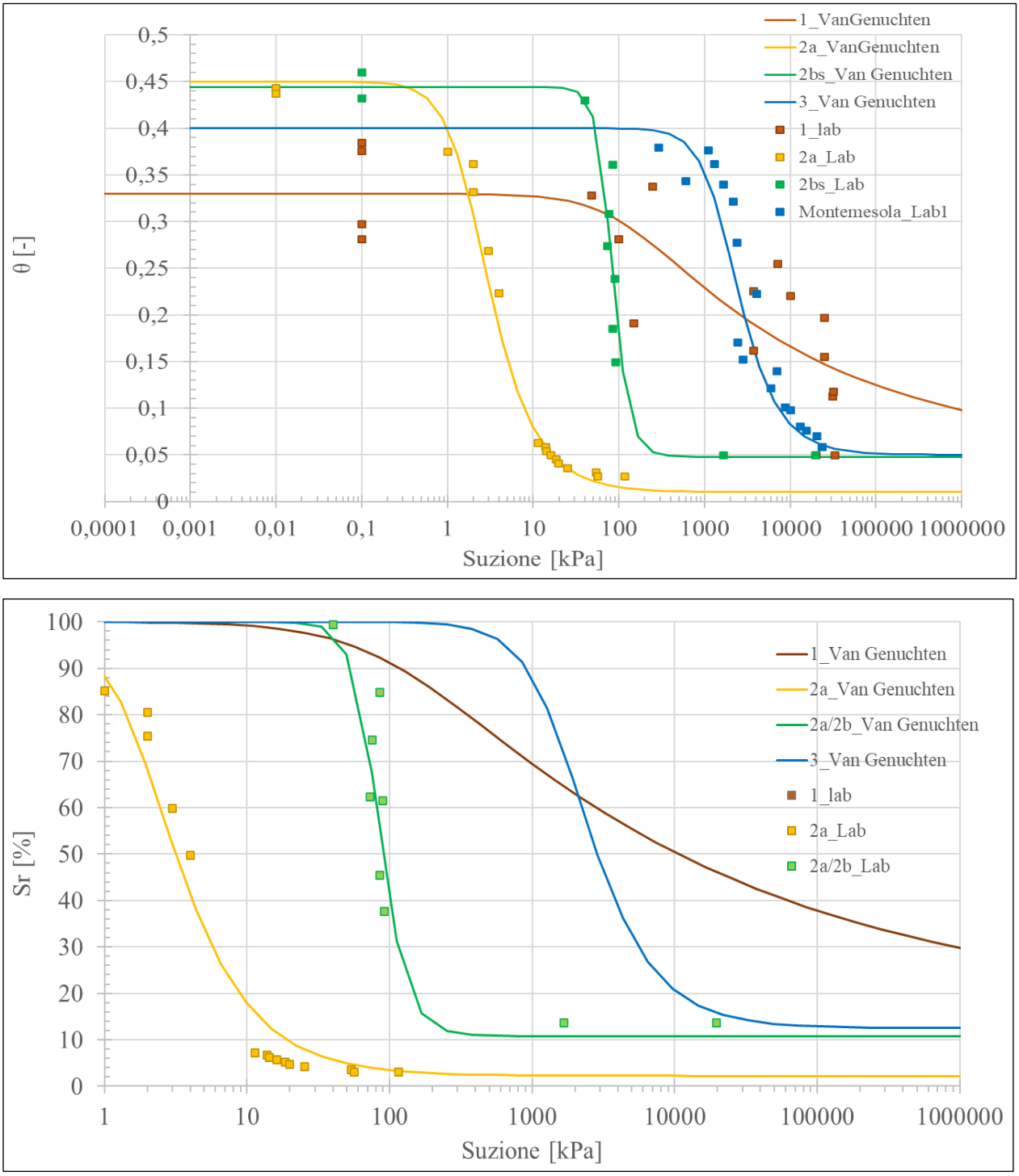


Figura 2.27 Curve di ritenzione misurate in laboratorio sui campioni C6i_A1, appartenente all'Unità 1, C4p_A1, appartenente alla sub-unità 2a, C11p_CiA, rappresentativo della sub-unità 2b, e su un campione di Argilla di Montemesola, che si ritiene rappresentativo dell'Unità 3. I dati sono stati interpolati utilizzando il modello di Van Genuchten-Mualem.

I risultati di prova sono stati interpolati, per ogni litotipo analizzato, con la funzione di Mualem-van Genuchten. Nello specifico, la risposta idraulica dei terreni parzialmente saturi sopra il piano di falda è stato simulato mediante le curve di ritenzione secondo la formulazione di van Genuchten (van Genuchten, 1980), mentre le curve di conducibilità idraulica (Figura 2.28) secondo la formulazione di Mualem (Mualem, 1976), attribuendo

ai parametri i valori (Tabella 2.17) che saranno dettagliati nel Capitolo 4 della presente relazione, in cui si sono condotte analisi dell'equilibrio limite, LEM, per indagare i possibili meccanismi di frana.

Tabella 2.17 Parametri idraulici adottati per le curve di ritenzione e di conducibilità idraulica.

	θ_{res}	θ_{sat}	$a=1/\alpha$	n	$m=1/n$	l	m_v	k_{sat}
	m^3/m^3	m^3/m^3	-	-	-	-	1/kPa	m/s
Unità 1	0.05	0.3297	103	1.192	0.1609	0.5	1.00E-7	5.00E-10/11
Unità 2a	0.01	0.45	1.9	2.1	0.5238	0.5	1.00E-7	1.00E-07/08
Unità 2b	0.048	0.444	79	4.80865	0.7920	0.5	1.00E-7	5.00E-09
Unità 3	0.05	0.4	1694.9	2.334	0.5716	0.5	1.00E-7	1.00E-10

In generale, come descritto nel Capitolo 8 della I Relazione di II Fase, le tre unità analizzate mostrano comportamenti idromeccanici, in condizioni di totale e parziale saturazione, coerenti con la granulometria che le caratterizza. L'Unità 1, caratterizzata da una preponderante componente fine, si comporta idraulicamente come una argilla, manifestando, pertanto, bassi valori di permeabilità ed alta capacità ritentiva in condizioni di parziale saturazione (Air Entry Value dell'ordine di 100 kPa; Figura 2.27).

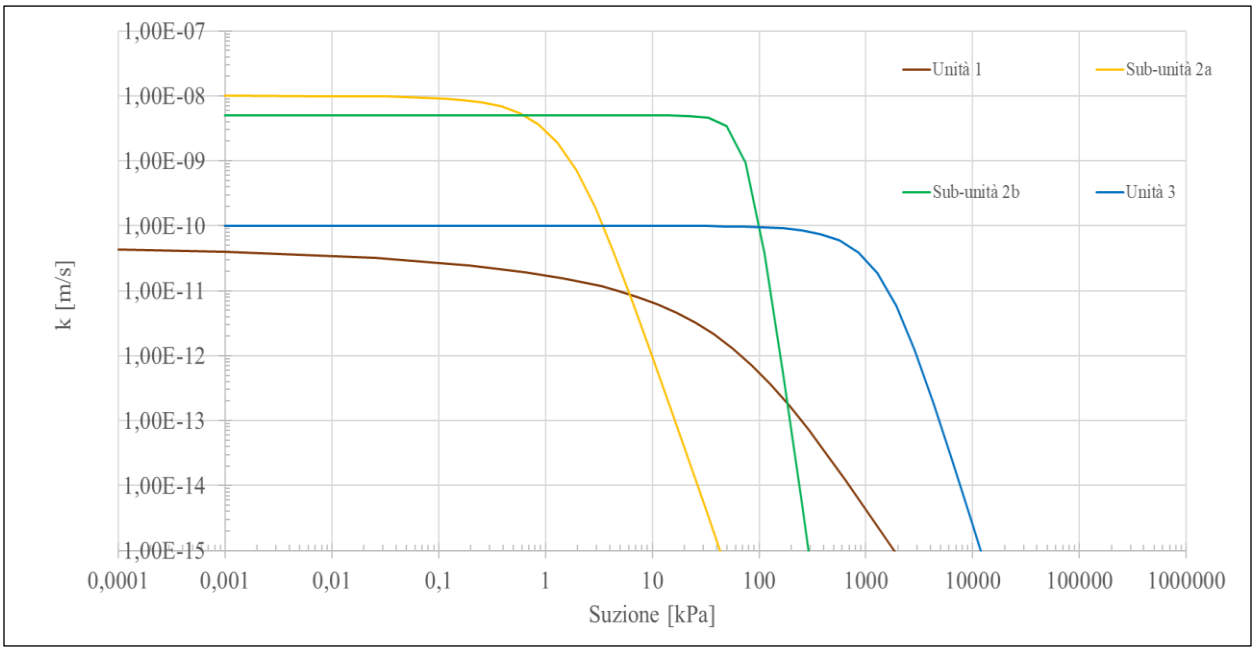


Figura 2.28 Curve di conducibilità idraulica dei diversi litotipi costruite utilizzando i parametri di fitting individuati durante l'interpolazione con il modello di Van Genuchten-Mualem dei dati di ritenzione riportati in Figura 3.6.

La sub-Unità 2a, avendo una spiccata componente sabbiosa, manifesta valori di permeabilità satura più alti, tipici di materiali più grossolani, unitamente ad una capacità ritentiva minima, testimoniata da un valore dell'Air Entry Value inferiore ad 1 kPa. Una via di mezzo è rappresentata dal comportamento idraulico del materiale afferente alla sub-Unità 2b che, configurandosi come un limo, manifesta valori sia della permeabilità satura che dell'Air Entry Value intermedi tra quelli dell'Unità 1 e quelli della sub-Unità 2a. Per l'Unità 3, come anticipato, si è assunto che le proprietà ritentive siano simili a quelle dell'argilla di Montemesola, che

tipicamente manifesta bassi valori di permeabilità ed alta capacità ritentiva dell'acqua in condizioni di parziale saturazione (Air Entry Value dell'ordine di 1000 kPa; Figura 2.27), anche se la caratterizzazione del comportamento parzialmente saturo dell'Unità 3 non rappresenta un problema rilevante, dato che l'analisi idrogeologica, dianzi richiamata, dimostra come l'unità sia pressoché sempre sotto falda, o comunque in condizioni di totale saturazione.

Nelle analisi LEM discusse nel seguente capitolo, i coefficienti di permeabilità satura k_{sat} delle diverse unità (Tabella 2.17) sono stati assimilati ai valori medi dei range di variazione desunti dalle prove sperimentali di laboratorio e di sito. Nello specifico, per l'Unità 1 si è assunto un valore di 5E-11 m/s, essendo l'intervallo di variazione compreso tra 1E-11 e 4E-10 m/s; per la sub-Unità 2a si è assunto k_{sat} pari a 5E-8m/s come valore intermedio dell'ampio range di variazione compreso tra 2E-10 e 3E-7 m/s, mentre per la sub-Unità 2b si è assunta caratterizzata da una permeabilità di 5E-9 m/s, valore intermedio dell'intervallo [1E-9 - 1E-8] m/s. All'Unità 3 si è assegnato un valore di permeabilità satura pari a 1E-10 m/s, come media nell'intervallo [1E-11 - 8E-10] m/s.

3.4 Profili delle suzioni s, che si ritiene vigano sopra falda, nella fase dell'anno corrispondente al prelievo dei campioni APOGEO

Individuate le curve di ritenzione misurate in laboratorio sui campioni C6i_A1, appartenente all'Unità 1, C4p_A1, appartenente alla sub-Unità 2a, C11p_CiA, rappresentativo della sub-Unità 2b, e su un campione di Argilla di Montemesola, che si ritiene rappresentativo dell'Unità 3, si sono desunte le suzioni corrispondenti ai gradi di saturazione misurati per i diversi campioni in laboratorio e diagrammati in Figura 2.24. In particolare, interpolando le curve di ritenzione tramite il modello di Van Genuchten-Mualem (Figura 2.27), noto per ogni campione il valore del grado di saturazione Sr (Tabella 2.18), si è derivato dalla curva di ritenzione il corrispondente valore di suzione, come mostrato nella Figura 2.29.

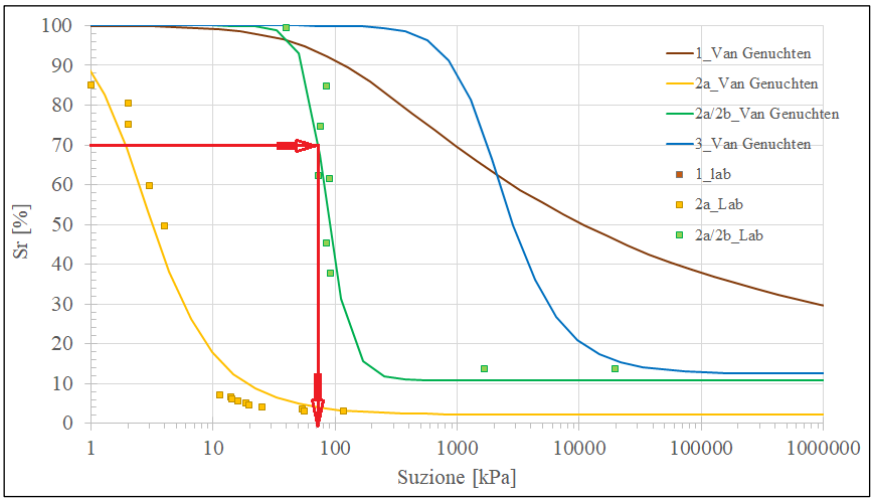


Figura 2.29 Individuazione dei valori di suzione s (kPa) dei campioni indisturbati di Chieuti, delle Unità 1, 2a e 2b, per interpolazione delle corrispondenti curve di ritenzione di ciascuna unità litologica, noti i valori del grado di saturazione Sr.

In questo modo si è tentato di stimare quali possano essere le suzioni presenti nella porzione sopra falda del versante oggetto di studio, laddove si ritiene vigano condizioni di parziale saturazione.

Nell'individuare attraverso il grado di saturazione S_r il valore di suzione s (kPa) intercettato sulle curve di ritenzione rappresentative delle quattro unità litologiche, si sono esclusi tutti i campioni afferenti all'Unità 3 poiché, come precisato dianzi, l'analisi idrogeologica ha dimostrato che tale unità è sempre in condizioni di totale saturazione.

Tabella 2.18 Suzioni s (kPa) che si ritengono vigano nella porzione sopra falda, dei campioni delle Unità 1, 2a e 2b, individuate sulle rispettive WRC in corrispondenza dei gradi di saturazione Sr dei singoli campioni, stimati in laboratorio.

Sigla campione	Campagna	intervallo z da pc (m)	z media da pc (m)	z (m) slm	Sr	Sr (%)	s (kPa)
Unità 1							
S6-C1	2013	5,00-5,50	5,25	203,99	71,0	0,710	870,75
C1p-A	2021	4,20-4,70	4,45	223,30	88,0	0,880	153,25
C2i-A	2021	4,70-5,00	4,85	220,47	82,0	0,820	287,80
C6i-A1	2021	5,00-5,50	5,25	209,85	92,0	0,920	90,40
C14p-A	2021	4,00-4,40	4,20	203,90	95,0	0,950	53,62
Unità 2a							
1a	1986	10,0-10,4	10,20	210,19	75,0	0,750	1,65
1b	1986	20,0-20,4	20,20	200,19	69,0	0,690	1,95
1c	1986	26,0-26,3	26,15	194,24	76,1	0,761	1,61
2a	1986	10,0-10,3	10,15	202,15	56,2	0,562	2,73
2c	1986	23,0-23,3	23,15	189,15	67,3	0,673	2,08
2d	1986	26,0-26,4	26,20	186,10	87,9	0,879	1,05
3a	1986	9,0-9,4	9,20	211,96	74,9	0,749	1,68
4a	1986	11,0-11,4	11,20	206,06	64,7	0,647	2,20
4b	1986	21,0-21,4	21,20	196,06	73,0	0,730	1,75
5a	1986	11,0-11,4	11,20	198,02	62,4	0,624	2,32
6a	1986	15,0-15,4	15,20	200,16	83,9	0,839	1,22
7a	1986	8,0-8,4	8,20	181,80	72,0	0,720	1,81
S1-C1	2013	20,40-20,90	20,65	188,44	90,0	0,900	0,93
S5-C1	2013	2,80-3,20	3,00	173,00	80,0	0,800	1,93
C1p_B	2021	11,60-12,00	11,80	215,95	68,0	0,680	2,20
C3di-A	2021	6,50-7,00	6,75	217,49	34,0	0,340	5,15
C3di-B	2021	9,00-9,50	9,25	214,99	39,0	0,390	4,31
C3di-C	2021	11,5-12,00	11,75	212,49	65,0	0,650	2,21
C4p-A1	2021	8,60-9,00	8,80	208,33	17,0	0,170	10,65
C5i-1A	2021	8,00-8,50	8,25	200,95	78,0	0,780	1,55
C6i-B	2021	15,00-15,60	15,30	199,80	62,0	0,620	2,40
C7p-A	2021	8,60-9,00	8,80	188,11	13,0	0,130	14,18
C8p-A	2021	9,0-9,50	9,25	206,25	94,0	0,940	0,72
C9i-A	2021	10,50-11	10,75	199,18	94,0	0,940	0,72
C9i-B1	2021	20,50-21,00	20,75	189,18	94,0	0,940	0,72
Unità 2b							
1d	1987	34,0-34,4	34,20	186,19	100,00	1,000	0,00
S1-C2	2013	22,50-23,00	22,75	186,34	84,70	0,847	58,10
S2-C1	2013	17,30-17,80	17,55	174,39	88,20	0,882	54,50
S3-C1	2013	22,60-23,00	22,80	198,82	72,40	0,724	70,00
S4-C1	2013	21,20-21,70	21,45	157,66	82,80	0,828	59,80
S5-C2	2013	9,30-9,80	9,55	166,45	87,80	0,878	55,00
S6-C2	2013	20,80-21,30	21,05	188,19	92,00	0,920	50,85
C1p-C	2021	20,50-21,00	20,75	207,00	97,00	0,970	38,60
C1p-D	2021	35,00-35,40	35,20	192,55	100,00	1,000	0,00
C2i-B	2021	32,50-33,00	32,75	192,57	94,00	0,940	46,90
C3di-D	2021	26,00-26,50	26,25	197,99	88,00	0,880	54,70
C4p-B	2021	29,00-29,50	29,25	187,88	80,00	0,800	62,65
C5i-2	2021	16,00-16,40	16,20	193,00	91,00	0,910	51,81
C6i-C	2021	25,50-25,90	25,70	189,40	92,00	0,920	50,85
C8p-B	2021	24,00-24,50	24,25	191,25	73,00	0,730	69,45
C9i-B2	2021	24,00-24,50	24,25	185,68	x	x	x
C10i-A1	2021	15,00-15,50	15,25	176,58	78,00	0,780	64,55
C11p-A	2021	10,00-10,50	10,25	155,86	91,00	0,910	51,81

Per ciascun campione, del quale è nota l'unità litologica di afferenza, la profondità media di prelievo e la quota assoluta s.l.m. (Tabella 2.18), è stato diagrammato in Figura 2.30 il valore della suzione s (kPa) con la

profondità di prelievo, z, al fine di valutare l'andamento con z all'interno della porzione sopra falda del versante.

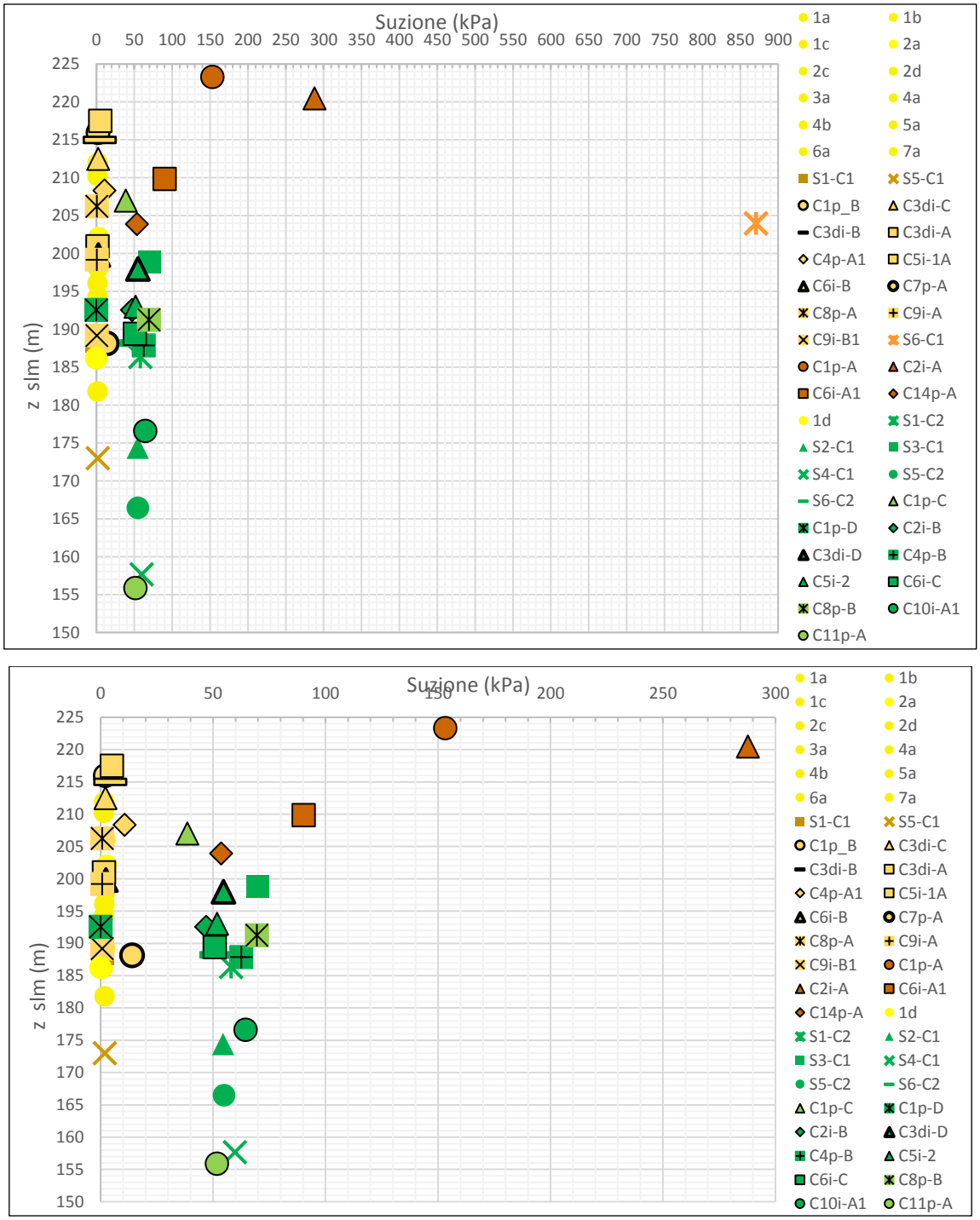


Figura 2.30 Profilo delle suzioni s (kPa) con la profondità (quota assoluta) dei campioni indisturbati di Chieuti, delle Unità 1, 2a e 2b.

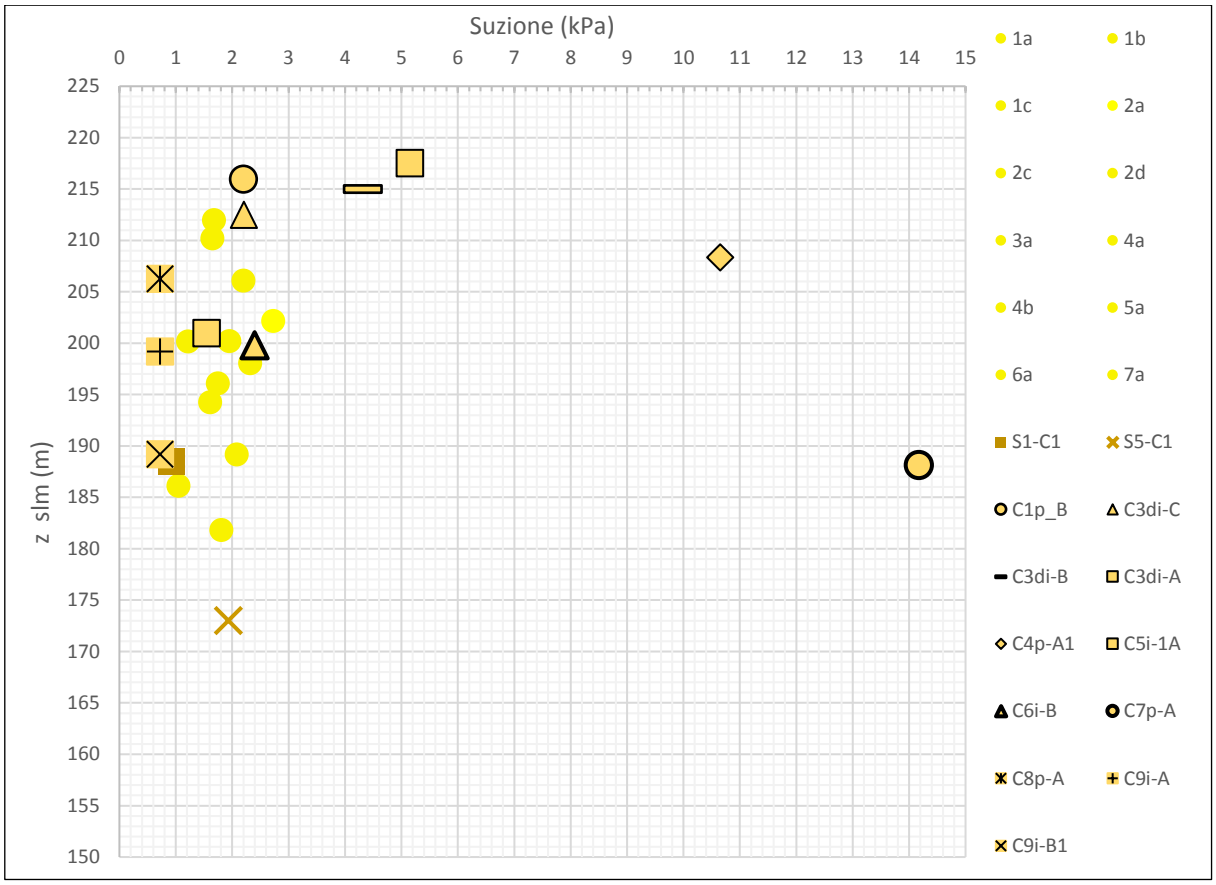


Figura 2.31 Profilo delle suzioni s (kPa) con la profondità (quota assoluta) dei campioni indisturbati di Chieuti afferenti alla sub-Unità 2a.

Il Conglomerato di Campomarino, che identifica l'Unità 1, si presenta come un materiale abbastanza ritentivo, come atteso dai valori $0.71 < S_r < 0.95$ dei suoi campioni (Figura 2.24) e dall'andamento della sua curva di ritenzione (Figura 2.27), per cui regge suzioni abbastanza elevate che raggiungono anche 870,75 kPa per il campione S6_C1, della campagna geognostica del 2013 (Figura 2.30), che è risultato particolarmente poco saturo. Si deve quindi contemplare l'ipotesi che in tale unità si possano verificare significative escursioni di suzione durante l'anno a seguito dell'interazione terreno atmosfera, ossia con l'infiltrarsi delle piogge ed a seguito dell'evapotraspirazione.

Le Sabbie di Serracapriola della sub-Unità 2a, si comportano a tutti gli effetti come un consistente dreno all'interno del versante, tanto da veicolare portate significative al loro interno. I valori di S_r risultano, al momento del prelievo in inverno, abbastanza dispersi per i campioni di questa sub- unità (Figura 2.24), con valore $0.13 < S_r < 0.94$. Ciononostante, per i quattro campioni che presentano i più bassi valori di S_r (13% per il C7p-A; 17% per il C4p_A1; il 34% e il 39% rispettivamente per il C3di_A e C3di_B) i valori di suzione non superano i 15 kPa (Figura 2.31).

La sabbia di tale sub-unità, infatti, è molto poco ritentiva e non regge alti valori di suzione. Si può quindi ritenere che le escursioni del grado di saturazione che si possono in essa verificare non fanno variare significativamente la suzione. Tali escursioni, quindi, si può presumere che non indurranno significative variazioni delle resistenze disponibili, come discusso nel capitolo 4, per cui non incideranno sulla stabilità.

Nei materiali che caratterizzano la porzione più limosa della sub-Unità 2b, si registrano valori di S_r nell'intervallo $0.722 < S_r < 1$. Fatta eccezione per il campione C1p_D e 1d, della campagna geognostica del 1987, risultati completamente saturi, gli altri campioni presentano valori di suzione $38\ kPa < s < 70\ kPa$ (Figura 2.30); i limi della sub-Unità 2b presentano, infatti, alta capacità ritentiva. Si deve quindi prevedere che in questa sub-Unità, differentemente da quanto vale per la sub-Unità 2a, si possano verificare variazioni di suzione anche dell'ordine di diverse decine di kPa al variare del grado di saturazione per l'interazione terreno-vegetazione-atmosfera. Di ciò si terrà conto nella discussione sulle resistenze disponibili nel pendio a fronte di quelle mobilizzate nei capitoli a seguire 4 e 6.

4 RESISTENZE OPERATIVE NELLE BANDE DI TAGLIO PRESENTI NEL PENDIO

4.1 Introduzione

Nel capitolo 9 della I Relazione di II fase sono state discusse le analisi dell'equilibrio limite di alcuni corpi di frana ritenuti possibilmente attivi nel pendio sulla base della banca dati sino ad allora acquisita dalle indagini e dai monitoraggi in situ. Tali analisi erano state condotte a ritroso (coefficiente di sicurezza FS assunto unitario), con l'obiettivo di valutare le resistenze mobilizzate, altrimenti dette operative, nelle bande di taglio (altrimenti dicasi lungo le superfici di scivolamento) ritenute attive, e quindi per caratterizzare, sulla base dei valori degli angoli di attrito mediamente operativi in dette bande di taglio, eventuali gerarchie di instabilità tra i diversi corpi di frana.

Come discusso nel capitolo 9 della I Relazione di II fase, dette analisi erano state eseguite per corpi di frana confinati da superfici di scivolamento tracciate essenzialmente sulla base dei risultati dei soli studi geo-morfologici, lito-stratigrafici e di caratterizzazione geotecnica del versante (discussi nei capitoli 6 e 7 della I Relazione di II fase). Tali superfici venivano già allora considerate di minima profondità tra quelle possibili. Si doveva infatti rimandare l'identificazione dell'effettiva profondità dei corpi di frana ad un'analisi dei dati che includesse non solo quelli sino ad allora acquisiti, ma altresì contemplasse dati di monitoraggio inclinometrico successivi e di più affidabile interpretazione rispetto a quelli sino ad allora rilevati. Infatti, già nel capitolo 10 della I Relazione di II Fase si era messo in evidenza come i rilievi inclinometrici lungo due verticali, la C10i e la C12i, stessero fornendo indicazione di una maggiore profondità della banda di taglio dei corpi P1 e P2 (Figure 1.38 e 1.39) rispetto a quelle meno profonde oggetto delle analisi riportate nella I Relazione di II Fase. Con quanto discusso nel capitolo 1 della presente relazione, si sono potute ricostruire le morfologie di più corpi franosi presenti nel versante (Figure 1.62 e 1.63), che risultano più profondi dei corpi analizzati nella I Relazione di II Fase. Ciò ha comportato la necessità di riesaminare l'equilibrio limite dei corpi nel versante e ricalcolare le resistenze operative corrispondenti, come discusso nel seguito. Nei nuovi calcoli si sono adottate le stesse ipotesi e metodologie di indagine dell'equilibrio limite adottate nella I Relazione di II Fase, che si richiamano solo brevemente nel seguito.

Nello specifico, nella I Relazione di II fase sono stati indagati diversi scenari morfologici dei corpi in profondità e possibili interazioni tra loro, secondo ipotesi che in parte saranno riprese nelle analisi che qui si discutono. Sulle superfici di scivolamento, inoltre, è stata imposta una distribuzione delle pressioni interstiziali rappresentata da una linea piezometrica fissata per ogni superficie sulla base dell'interpolazione dei livelli piezometrici rilevati attraverso le celle piezometriche più vicine alla superficie. Infatti, le analisi non erano state condotte, prima della stesura della I Relazione di II fase, impostando lungo la superficie di scivolamento una distribuzione delle pressioni interstiziali desunta da calcoli di filtrazione nel pendio, metodologia che è stata poi implementata per ulteriori analisi dell'equilibrio limite discusse nel presente capitolo.

Attraverso dette analisi dell'equilibrio limite, nella I Relazione di II Fase si era quindi verificato come l'attività di corpi collocati nella parte di monte del pendio potesse essere o meno verosimile, anche contemplando la presenza degli edifici, e si erano desunte le morfologie e condizioni per cui i corpi potessero avere minore

stabilità. I corpi di monte, infatti, sono stati riscontrati avere massima instabilità nell'ipotesi che al loro piede, posto nella parte alta del pendio (Figura 9.3.2 della I Relazione di II Fase; corpi Mi), l'attività del corpo P1 ne comporti una riduzione in spinta laterale stabilizzante al piede. Il caso in cui ciò si verifica è stato definito Meccanismo di tipo 2 nella I Relazione di II fase (Figura 9.2.1 di tale relazione e richiamata nel seguito in Figura 4.1).

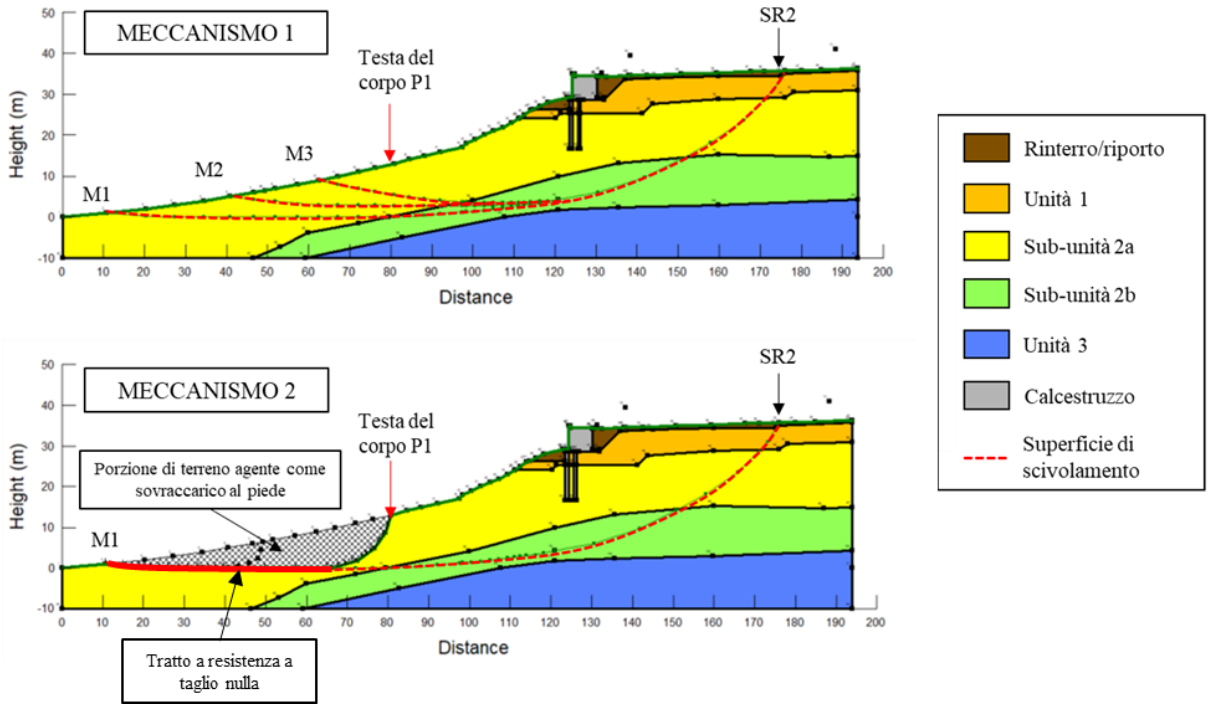


Figura 4.1 Rappresentazione dei meccanismi di rottura esaminati nella I Relazione di II fase

Tali analisi hanno allora suggerito che, nell'ipotesi di attività attuale di corpi relativamente poco profondi alla testa del versante, la loro attività è confermata da analisi dell'equilibrio limite se si contempla una lenta attività dei corpi più grandi, antichi e profondi presenti a valle, in particolare del corpo P1. Tale risultato aveva quindi messo in luce, già al termine della I Relazione di II Fase, che anche nell'ipotesi che l'attività alla testa del versante fosse oggi connessa a corpi mediamente profondi (Cruden & Varnes, 1996), essa scaturirebbe comunque dall'attività di corpi profondi a valle e non risulterebbe avulsa dall'equilibrio dell'intero versante (esteso sino ai fossi presenti al piede, ossia gli affluenti del vallone del Fico). Si era verificato che ciò fosse verosimile anche nell'ipotesi che i corpi P2 e P1 avessero profondità entro 40 m.

Le analisi dell'equilibrio limite del corpo P1*, assunto di circa 35 m di profondità massima nella I Relazione di II Fase, avevano inoltre indicato la sua plausibile instabilità attuale, in ragione del confronto tra la resistenza operativa lungo la superficie di scivolamento, caratterizzata da φ'_{mob} =15°, e quelle disponibili nell'ipotesi che le argille dell'Unità 3 fossero a residuo lungo tale superficie. Si era allora assunto φ'_{RES} = 10-13° sulla base della letteratura (Lupini et al., 1981), ossia un valore più basso di quello misurato con la prosecuzione delle attività di laboratorio. In particolare, l'esecuzione della prova di taglio anulare sul campione C15i-B1 discussa nel capitolo 2 (Tabella 2.11), che ha conferito φ'_{RES} = 15.3°, oggi fa riconoscere che un corpo P1* della profondità massima di 35 m è più stabile di quanto ritenuto in precedenza, per quanto, il riscontro

dell'uguaglianza del φ'_{mob} =15° con il valore misurato in laboratorio continua a confermare la plausibilità dell'attività di un corpo P1 del tipo testato nel capitolo 9 della I Relazione di II Fase. Le analisi riportate in tale relazione avevano anche messo in evidenza un aumento dell'instabilità del corpo P1* con l'approfondirsi della sua superficie di scivolamento, suggerendo la possibilità che corpi di frana più grandi e profondi fossero meno stabili del P1* testato con l'equilibrio limite (LEM).

Le analisi LEM avevano inoltre indicato come sia verosimile che il corpo P1 si sia mosso per retrogressione della rottura a seguito dell'iniziale mobilizzazione del corpo P2 nella parte bassa del versante, in ragione dei crescenti valori della resistenza mobilizzata dall'equilibrio di corpi con testa in posizione via via più retrogressa. Come illustrato nel capitolo 9 della I Relazione di II fase (Tabella 9.5.2), infatti, l'angolo di attrito mobilizzato dall'equilibrio del corpo P2 era stato allora calcolato pari a 14.4°, se la testa era in corrispondenza della scarpata SR0, 14.6°, se la testa era in corrispondenza di una scarpata più arretrata rispetto a SR0, fino a giungere al valore di 15.1°, per il corpo P1* con testa in corrispondenza della scarpata SR2.

Come dianzi detto, le analisi LEM eseguite nella I Relazione di II fase sono state condotte implementando il regime delle pressioni interstiziali con l'imposizione della linea piezometrica. Come è noto, tale metodo soffre delle incertezze relative ai valori reali dei livelli piezometrici lungo la superficie di scivolamento esaminata. Una più accurata analisi dell'equilibrio limite deve prevedere la valutazione del regime piezometrico attraverso simulazioni numeriche della filtrazione nel pendio, che implementino le più realistiche condizioni idrauliche al contorno ed i parametri idraulici dei materiali. Tali analisi sono state, dunque, condotte successivamente e vengono discusse nel seguito nel presente capitolo. I risultati delle analisi della filtrazione sono stati, infatti, implementati in nuove analisi LEM, per dedurre i valori di φ' operativi su più superfici di scivolamento, che sono stati poi confrontati con i valori delle resistenze disponibili dei terreni attraversati, valutate anche alla luce delle più recenti misure di φ'_{RES} discusse nel capitolo 2 della presente relazione. In particolare, per la Sub-unità 2a la resistenza residua φ'_{RES} è da considerarsi pari a quella a stato critico, o ultima, stimata pari a 34-35° (capitolo 7 della I Relazione di II Fase e capitolo 2 della presente relazione); per la Sub-unità 2b, come detto nel capitolo 2 le resistenze minime sono state misurate sui campioni S1-C2, S2-C1, S3-C1, S5-C2 testati nella campagna di indagine 2013, per cui si è misurato φ'_{RES} compreso tra 16.3° e 18.7°. Per l'argilla di Montesecco dell'Unità 3, si è contemplato il valore φ'_{RES} pari a 15.3°, come descritto nel capitolo 2 della presente relazione.

Fatte queste premesse, nel seguito saranno dapprima illustrati i risultati di analisi parametriche LEM di corpi ritenuti possibilmente attivi nel pendio anche alla luce dei rilievi più recenti, successivi alla I Relazione di II Fase. Tali analisi parametriche hanno implementato dapprima la linea piezometrica per simulare la distribuzione delle pressioni interstiziali lungo la superficie di scivolamento. Successivamente, la filtrazione stazionaria è stata calcolata con analisi numeriche agli elementi finiti, FEM ed i risultati sono stati implementati in analisi LEM. In particolare, le analisi a ritroso dell'equilibrio limite dei corpi P1*, P2 e del più probabile corpo di monte in scarpata, del tipo C in Figura 1.25, sono quelle che hanno implementato la filtrazione in atto nel pendio e, dunque, forniscono un maggiore avanzamento nell'interpretazione delle resistenze operative nel versante, che permette una identificazione più realistica della gerarchia di attività dei corpi di frana nel versante.

4.2 Nuove analisi LEM dei meccanismi di instabilità nella sezione CC

4.2.1 Analisi con la linea piezometrica

Le analisi LEM, in cui le pressioni interstiziali lungo la superficie di scivolamento sono state definite con linea piezometrica, sono state condotte a ritroso per i corpi di frana intercettati dalla sezione CC, la cui traccia è riportata in Figura 4.2 e che risulta quella di massima pendenza attraverso il pendio dalla scarpata SR2 sino al piede lungo il fosso. Le analisi sono state condotte con il codice Slope/w (Geo-Slope International, 2004) secondo i due meccanismi di frana già definiti nella I Relazione di II fase (Figura 4.1). Nello specifico, è stato analizzato l'equilibrio limite di corpi globalmente in scivolamento senza interazione con altri, secondo il Meccanismo di tipo 1 in Figura 4.3. Con riferimento a questo meccanismo, sono stati analizzati: il corpo P2 alla base del versante; il corpo più esteso e retrogresso sino alla scarpata SR2, P1* (Figura 1.25); due corpi che, con piede a circa metà altezza del pendio, raggiungono a monte la scarpata SR2, ma che sono relativamente meno profondi, M1 e T2 (con profondità massima pari a 30 m e 37 m, rispettivamente). Questi ultimi corpi sono stati analizzati per verificare quanto l'instabilità della parte alta del versante, che mette in crisi il centro storico del paese, possa essere connessa ad un meccanismo di frana con piede a metà pendio, invece che al fosso a valle.

Inoltre, è stato analizzato l'equilibrio limite di corpi in scarpata, Ci: C1, C2 e C3, attivi secondo il Meccanismo di tipo 2 in Figura 4.3. Questi rappresentano rispettivamente la porzione più retrogressa dei corpi M1, T2 e P1*, ma nella parte di piede soggiacciono al corpo di frana P1, assunto in movimento. Proprio poiché nel Meccanismo 2 si assume che il corpo P1 in movimento sia svincolato, se non che per interazione al contatto, dai corpi Ci, questi sono definiti corpi di retrogressione in scarpata, o più semplicemente, corpi in scarpata, equivalenti in tipologia al corpo C in Figura 1.25 del capitolo 1. Infatti, con il Meccanismo di tipo 2 si implementa nell'analisi LEM l'effetto che lo spostamento del corpo P1 genera in scarpata in termini di riduzione del contrasto al piede della scarpata, dunque dei corpi Ci. Ciò è simulato assumendo la porzione del corpo P1 che sovrasta il piede dei corpi Ci come un sovraccarico, agente lungo il contatto tra P1 e ognuno dei Ci, sede di resistenza a taglio nulla. Il terreno del corpo P1, quindi, non può esercitare alcuna azione di contenimento laterale al piede dei corpi Ci. Dato che, in realtà, per quanto l'attività del corpo P1 scarichi lateralmente il piede dei corpi in scarpata, Ci, non annulla però la forza orizzontale al piede di tali corpi (è infatti plausibile che permanga un'interazione laterale tra i corpi Ci ed il P1 anche se questo si muove verso valle), le analisi LEM secondo il Meccanismo 2 molto probabilmente forniscono una sovrastima dell'angolo di attrito mobilizzato per i corpi in scarpata Ci. Si rimarca, dunque, che ove nelle analisi secondo il Meccanismo 1 già si implementa la retrogressione della rottura sino alla scarpata SR2 (come discusso nel capitolo 1 - Figura 1.25 – con riferimento al corpo P1*), il Meccanismo 2 è qui trattato essenzialmente per stimare quanto la presenza di una discontinuità materiale tra le masse a valle ed il terreno a monte possa aumentare l'instabilità in scarpata.

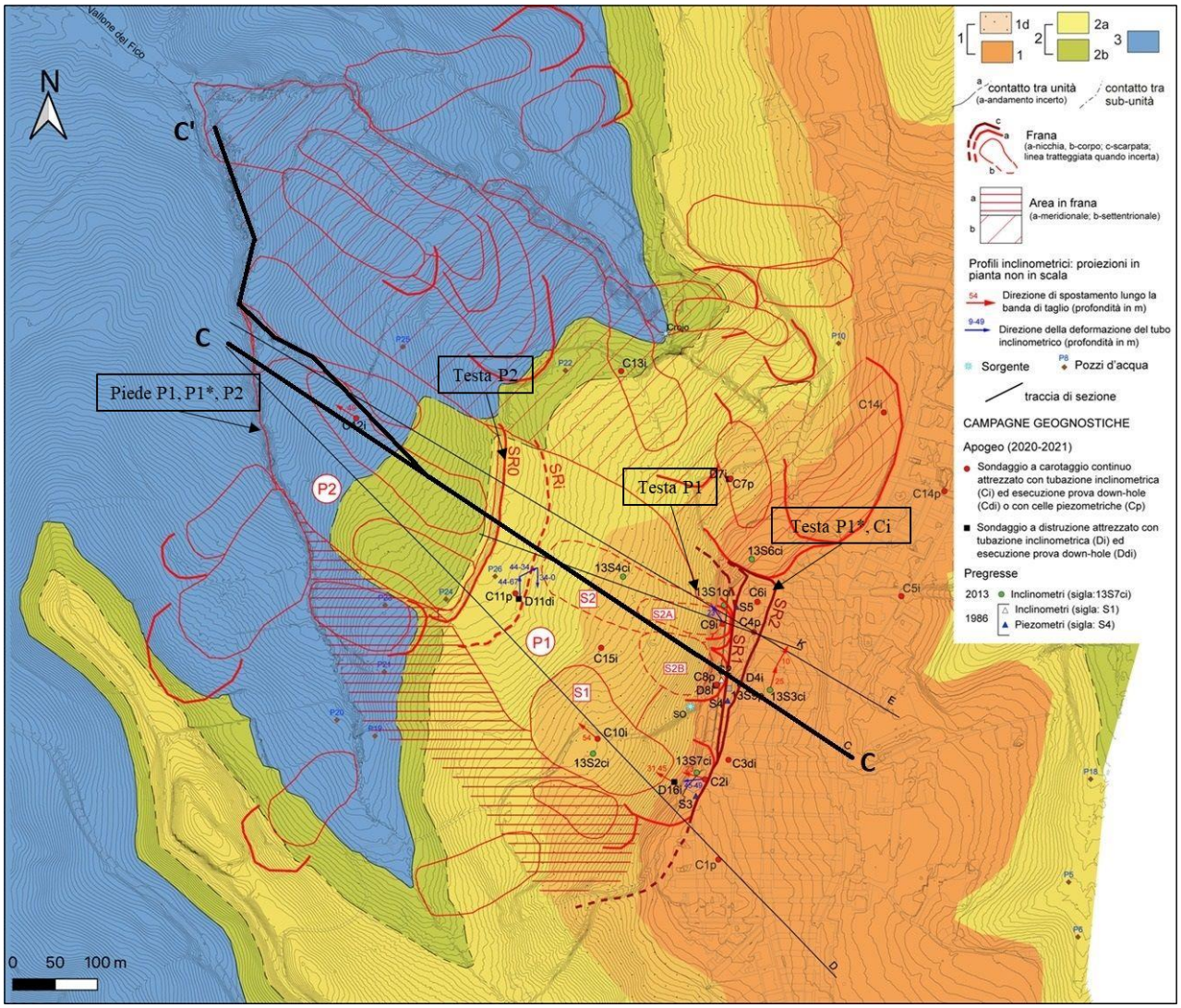


Figura 4.2 Carta litostratigrafico-geomorfologica del versante Ovest del comune di Chieuti con le tracce delle sezioni esaminate nelle analisi LEM dei corpi di frana

Volendo chiarire i dettagli esecutivi del calcolo secondo il Meccanismo 2, va detto che in tale calcolo si è assunto che la porzione di terreno confinata tra il piano campagna e la superficie del corpo P1 (area retinata nella Figura 4.1 e nella Figura 4.3) equivalga ad un carico puramente verticale, agente lungo la superficie di contatto tra i corpi Ci ed il P1, seguendo l'approccio adottato in Cotecchia et al. (2004). Inoltre, si assume resistenza a taglio nulla lungo la porzione di piede della superficie di scivolamento del corpo Ci, lungo il tratto che collega il piede del corpo Ci, interno al pendio, ed il piano campagna del pendio (linea rossa continua in Figura 4.1 per i corpi Ci del Meccanismo 2). Il peso per unità di volume del terreno che compone il corpo P1 e sovrasta il piede del corpo Ci è assunto pari al peso unitario totale del terreno nel pendio, γ, o al peso sommerso, γ', o ad un valore intermedio, a seconda delle pressioni interstiziali agenti lungo il piede del copro Ci (che variano al variare della posizione del pelo libero) come descritto nel seguito.

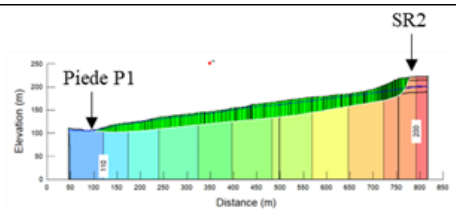
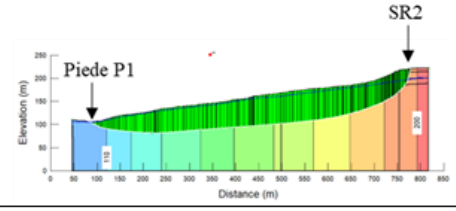
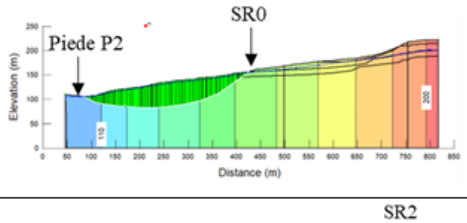
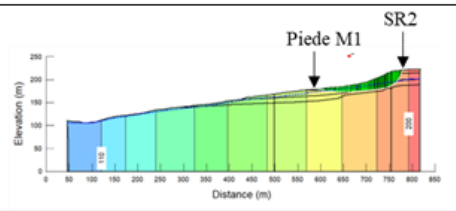
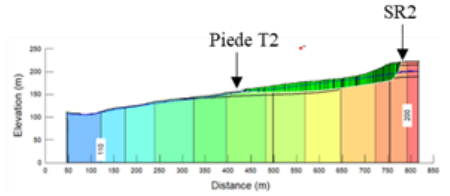
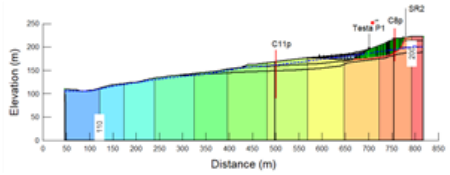
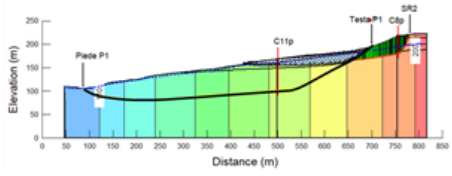
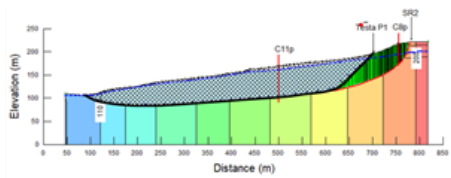
MECCANISMO di tipo 1	CORPO P1* (superficiale)	Profondità max	35 m	
		Piede	affluente del vallone del Fico	
		Testa	SR2	
	CORPO P1* (profondo)	Profondità max	60-70 m	
		Piede	affluente del vallone del Fico	
		Testa	SR2	
	CORPO P2	Profondità max	50 m	
		Piede	affluente del vallone del Fico	
		Testa	SR0	
	CORPO M1	Profondità max	30 m	
		Piede	alla quota di 179 m s.l.m.	
		Testa	SR2	
	CORPO T2	Profondità max	37 m	
		Piede	alla quota di 157 m s.l.m.	
		Testa	SR2	
MECCANISMO di tipo 2	CORPO C1	Profondità max	30 m	
		Piede	alla quota di 187 m s.l.m.	
		Testa	SR2	
	CORPO C2	Profondità max	37 m	
		Piede	alla quota di 185 m s.l.m.	
		Testa	SR2	
	CORPO C3	Profondità max	50 m	
		Piede	alla quota di 157 m s.l.m.	
		Testa	SR2	

Figura 4.3 Corpi di frana ipotizzati secondo i meccanismi di tipo 1 e 2. Si fa presente che si fa riferimento, a titolo esemplificativo, alla distribuzione delle pressioni interstiziali con linea piezometrica, il che comporta che le linee equipotenziali segnate in figura sono verticali.

In generale, quando la distribuzione delle pressioni interstiziali è implementata con linea piezometrica, le pressioni interstiziali assumono un andamento triangolare al di sopra del pelo libero, ove il terreno è sede di pressioni interstiziali negative (di cui la suzione è il valore assoluto). La pressione interstiziale entra nel calcolo della resistenza alla base delle strisce che formano il corpo di cui si esamina l'equilibrio, ed è determinata come prodotto dell'altezza della linea piezometrica rispetto alla base della striscia per il peso dell'unità di volume dell'acqua, γ_w, se la base della striscia è sotto falda. Se la base della striscia si trova sopra il pelo libero, invece, la suzione entra nel calcolo della resistenza se si adotta una delle formulazioni disponibili nel codice, quali quella di Vanapalli et al (1996) o Fredlund and Rahardjo (1993).

Nella simulazione del Meccanismo 2, se la superficie che confina superiormente il corpo Ci giace al di sotto della linea piezometrica, nel calcolo LEM il codice Geoslope assume che tale superficie sia sede di pressioni interstiziali pari al peso della colonna d'acqua di altezza pari alla differenza di quota tra la linea piezometrica e la superficie che confina il copro. Pertanto, parte del peso del corpo P1 al di sopra del corpo Ci è contemplata da tale passaggio di calcolo e ciò deve essere contemplato nell'analisi LEM del corpo Ci. A tal fine, il peso dell'acqua che già grava sul piede del corpo deve esere sottratto al peso del corpo P1 e ciò è stato fatto riducendo il peso unitario del terreno. Si è quindi adottata una strategia per determinare il peso equivalente γ^* da assegnare al terreno del corpo P1 tenendo in conto l'effettiva posizione del pelo libero, come spiegato nel seguito.

Se A_{TOT} è l'area della sezione della porzione del P1 gravante sul piede del corpo Ci, e A_1 e A_2 sono rispettivamente l'area sopra sotto la linea piezometrica (Figura 4.4), allora il peso unitario equivalente γ^* può essere determinato con l'espressione (4.1):

$$\gamma^* = \frac{\gamma A_1 + \gamma' A_2}{A_{TOT}} \tag{4.1}$$

dove γ è il peso dell'unità di volume totale del terreno, assunto pari a 19 kN/m^3, e γ' è il peso dell'unità di volume sommerso, assunto pari a 9 kN/m^3. Nella Tabella 4.1 sono sintetizzati i valori delle aree e dei pesi unitari che sono stati contemplati in ciascun calcolo LEM dei corpi Ci.

Tabella 4.1 Valori del peso unitario equivalente γ^* assegnati per il calcolo dell'equilibrio dei corpi in scarpata Ci con linea piezometrica

	corpo C1	corpo C2	corpo C3
A_{tot}	845.2	4113	2955.5
A_1	501.9	1590.6	471.8
A_2	343.3	2522.4	2483.7
γ^*	14.94	12.87	10.6

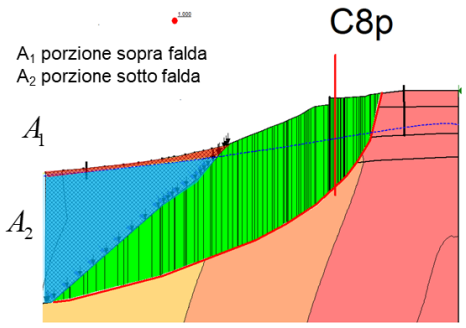


Figura 4.4 Modellazione del meccanismo 2 dei corpi in scarpata sotto falda

Occorre precisare che, come descritto nel capitolo 3 della presente relazione, secondo la ricostruzione idrogeologica il pelo libero della falda appare collocarsi poco al di sopra del contatto litostratigrafico tra la Sub-unità 2a e la Sub-unità 2b, se non che in aree dove la sub-unità 2b appare sede di parziale saturazione. Infatti, l'analisi dei gradi di saturazione misurati su campioni prelevati nella Sub-unità 2b suggerisce essa può non essere ovunque completamente sommersa. Ciò implica che il pelo libero può essere a luoghi più profondo di quanto considerato nelle simulazioni qui illustrate e che possano vigere suzioni significative in alcune porzioni della sub-unità 2b. Se l'interazione del pendio con l'atmosfera comporta un abbattimento di tali suzioni, questa può generare transitorie instabilità locali di corpi superficiali.

Occorre infine evidenziare che per quanto, nell'area di scarpata, la morfologia della superficie di scivolamento dei corpi più profondi, P1* e C3, oggetto del calcolo LEM (Figura 4.3) differisca leggermente da quella riportata in Figura 1.63 del capitolo 1 (§1.4), tale differenza non incide (a meno di qualche decimo di grado) sul valore dell'angolo di attrito mobilizzato dall'equilibrio.

Per il corpo P1* sono state considerate due superfici di scivolamento (Figura 4.3): una di minima profondità massima, di circa 35-40 m, del tipo analizzata nella I Relazione di II fase prima che si integrassero i dati di monitoraggio profondo e di superficie come mostrato nel capitolo 1 della presente relazione, ed una di profondità massima circa 70 m, desunta dall'analisi integrata di tutti i dati di monitoraggio ad oggi disponibili (Figura 1.63). Entrambe le superfici di scivolamento hanno testa in corrispondenza della scarpata SR2 ed il piede nel corpo idrico di valle.

Il corpo P2 è stato definito con una superficie di scivolamento di profondità massima circa 50 m, coerente con la profondità della superficie di scivolamento del corpo profondo P1*, ma con testa in corrispondenza del gradino morfologico rilevato a metà pendio, ossia della scarpata SR0, e piede nell'affluente del vallone del Fico. I corpi M1 e T2 sono corpi relativamente meno profondi con testa in corrispondenza della scarpata SR2 e piede a quote leggermente differenti, ma entrambe a metà pendio. Come detto, sono stati verificati per capire quanto il loro livello di instabilità possa differire da quello di corpi più profondi ed ampi.

Ove, come anticipato, lungo la porzione sotto falda della superficie di scivolamento dei corpi di frana è stata assunta la distribuzione delle pressioni interstiziali secondo la linea piezometrica (desunta dall'interpolazione dei livelli piezometrici delle celle piezometriche più vicine alla superficie di scivolamento), nelle porzioni sopra falda si assume un andamento idrostatico delle pressioni interstiziali negative. Come detto, il codice consente di tener conto dell'effetto benefico della suzione attraverso diverse formulazioni della resistenza a

taglio proposte in letteratura. In questa serie di analisi LEM, nella porzione sopra falda della superficie di scivolamento è stato adottato il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb modificato, secondo l'Eq. 4.2 proposta da Fredlund and Rahardjo (1993):

$$\tau_f = c' + \sigma_n \tan(\varphi') + s \tan(\varphi_b') \quad (4.2)$$

dove φ'_b è l'angolo d'attrito che tiene conto dell'incremento della resistenza a taglio dovuto alla suzione *s*.

Nel caso in esame, nella determinazione delle resistenze mobilizzate dall'equilibrio sono stati valutati due scenari estremi:

a) si è trascurato l'effetto benefico della suzione sulla resistenza a taglio, assumendo φ'_b nullo; tale scenario equivale a considerare che le suzioni sopra falda siano piccole o nulle e i loro effetti sulla stabilità dei corpi trascurabili;
b) si è considerato il massimo effetto della suzione sull'incremento della resistenza, assumendo φ'_b pari all'angolo di resistenza a taglio mobilizzato.

Per ogni corpo di frana si è desunto il valore dell'angolo d'attrito mobilizzato φ'_{mob} in media lungo la superficie di scorrimento, assumendo c'_{mob} nullo. Le analisi sono state condotte con il metodo di Morgenstern e Price (1965), implementato nel modulo Slope/W del codice GeoStudio (Geo-Slope International, 2004).

I valori di φ'_{mob} sono sintetizzati in Tabella 4.2 per il Meccanismo di tipo 1 e in Tabella 4.3 per il Meccanismo di tipo 2.

Dall'analisi dei risultati si deduce che, nel contesto del Meccanismo di tipo 1 dei corpi profondi, l'equilibrio limite del corpo P1* più profondo mobilizza il φ'_{mob} massimo. Quindi, l'equilibrio limite analizzato imponendo la linea piezometrica suggerisce che il P1* profondo è il più instabile tra i corpi analizzati e per cui si assume un'attività per scivolamento autonomo dall'interazione con altri corpi. In particolare, i risultati complessivamente mostrano che il P1* più profondo è più instabile del P1* meno profondo, e che, dunque, l'instabilità di corpi di tipo P1* aumenta con la profondità almeno sino a profondità di 70 m.

Tabella 4.2 Resistenze mobilizzate dall'equilibrio dei corpi lungo la sezione CC secondo il meccanismo di rottura di tipo 1 - linea piezometrica

MECCANISMO DI TIPO 1									
CORPO P1* (superficiale)		CORPO P1* (profondo)		CORPO P2		CORPO M1		CORPO T2	
φ'_b=0	φ'_b=φ'	φ'_b=0	φ'_b=φ'	φ'_b=0	φ'_b=φ'	φ'_b=0	φ'_b=φ'	φ'_b=0	φ'_b=φ'
15.1	14.8	15.4	15.2	14.3	14.3	16.3	15	13.8	13.2

Tabella 4.3 Resistenze mobilizzate dall'equilibrio dei corpi lungo la sezione CC secondo il meccanismo di rottura di tipo 2 - linea piezometrica

MECCANISMO DI TIPO 2					
CORPO C1		CORPO C2		CORPO C3	
φ'_b=0	φ'_b=φ'	φ'_b=0	φ'_b=φ'	φ'_b=0	φ'_b=φ'
19.7	18.3	19.8	18.7	27.6	26.9

Inoltre, poiché le analisi LEM riportate nella I Relazione di II Fase hanno mostrato che tra il corpo P1 ed il P1*, il secondo è quello per cui il φ'_{mob} è maggiore per qualsiasi profondità, e poiché i risultati in Tabella 4.2 mostrano che il φ'_{mob} del P1* è anche maggiore di quello del P2, si può ritenere che il P1* sia il più instabile dei corpi in scivolamento con piede che raggiunge l'affluente del vallone del Fico al piede del pendio. Ciò conferma, su base analitica, la profondità del corpo in scivolamento nella parte di valle del versante, altrimenti desunta solo sulla base dei dati di sito nel capitolo 1 di questa relazione (Figura 1.63). Infatti, prima di tale analisi la profondità del P1* è stata desunta dal monitoraggio inclinometrico lungo le verticali C12i e C10i, nonché dall'assenza di piegamento rilevata nel monitoraggio inclinometrico lungo le verticali C15i e D11i (per le quali il piede della tubazione inclinometrica è stato valutato non ammorsato in zona stabile). Ulteriore osservazione che valida questa conclusione è che il φ'_{mob} del corpo P1* profondo, la cui superficie di scivolamento si sviluppa più che per gli altri corpi nella parte più argillosa e plastica dell'Unità 3, risulta superiore alla resistenza residua φ'_{RES}, pari a 15.3°, mentre la resistenza operativa del corpo P2 risulta inferiore a φ'_{RES}, anche se di poco.

Il corpo M1 è delimitato da una superficie che si sviluppa per il 60% nelle Unità 1 e 2a, di resistenza ultima mediamente pari, rispettivamente, a 34-35° e 22.3°, e per il 40% nella Sub-unità 2b, la cui resistenza residua, $\varphi'_{RES,}$ è risultata compresa tra 16.3° e 18.7°. La superficie del corpo T2, invece, si sviluppa in maniera predominante nella Sub-unità 2b, interessando solo per il 10-15% la Sub-unità 2a e l'Unità 1. I valori dei φ'_{mob} per i corpi M1 e T2 risultano inferiori alle resistenze disponibili allo stato residuo, φ'_{RES}, nei terreni attraversati dalle superfici di scivolamento, il che suggerisce che tali corpi siano decisamente più stabili del P1*.

I risultati delle analisi LEM quindi appaiono confermare che, nell'ipotesi che nel pendio sia attivo un Meccanismo di frana di tipo 1, lo scivolamento sia profondo, mobilizzi resistenze vicine a quella residua, come atteso per un movimento attivo da molto tempo (paleofrana), ed abbia portato ad una retrogressione della rottura tale che oggi lo scivolamento parte dal piede collocato a ridosso dell'affluente del fosso del Fico e si sviluppa lungo una banda di taglio che raggiunge a monte la scarpata SR2. Corpi meno profondi in scivolamento con Meccanismo 1, sia con piede al fosso e testa a valle della scarpata SR2, o con testa alla scarpata SR2 e piede a metà pendio, sono meno instabili del P1*. L'instabilità del corpo P1* va considerata ancor maggiore di quanto rappresentato dal φ'_{mob} in Tabella 4.2 (ossia il φ'_{mob} è plausibilmente maggiore), in quanto è verosimile che l'attività del corpo P2 sia periodicamente innescata dall'erosione delle sponde del fosso al piede del versante. Di conseguenza, l'attività del P2 è maggiore di quanto rappresentato dal φ'_{mob} in Tabella 4.2 ed incide sull'equilibrio delle masse interne al corpo P1*, poiché elimina contrasto nella parte di piede, in zona di spinta passiva. Dunque, se si modellizzasse l'attività delle masse del corpo P1* contemplando un Meccanismo di tipo 2, il valore di φ'_{mob}(P1*) risultante dalle analisi sarebbe maggiore.

Le analisi condotte secondo il Meccanismo di tipo 2 forniscono dei φ'_{mob} maggiori rispetto alle analisi relative al Meccanismo di tipo 1. Tuttavia, una valutazione di quanto i corpi Ci siano o meno più instabili di quelli profondi a valle deve prevedere il confronto tra il φ'_{mob} ed i φ' disponibili nei terreni attraversati dalle bande di taglio. Così si può riconoscere che, essendo la superficie dei corpi C1 e C2 largamente nella Sub-unità 2b, il

φ'_{mob}(C1) e φ'_{mob}(C2) in Tabella 4.3 possono considerarsi vicini al φ'_{RES}. Quindi, l'analisi mostra che un corpo in scarpata, di profondità massima di 37 m ed interagente al piede con il copro P1 assunto attivo (che si sposta lentamente verso valle), può risultare instabile quanto il corpo più profondo di valle, P1*. Va rimarcato che, però, la sua instabilità è comunque connessa all'attività dei corpi profondi di valle, in quanto prevede un Meccanismo di tipo 2. Ciononostante, per la sezione CC tale attività non appare confermata dal monitoraggio inclinometrico lungo le verticali C8i e C15i, per cui i dati di monitoraggio non sono compatibile con l'attività di corpi tipo C1 e C2 di larghezza in scarpata quanto l'intera estensione della scarpata SR-SR2. Un corpo tipo C1 o C2 potrebbe però essere più stretto ed attivo a ridosso della verticale inclinometrica C9i, ove si è registrato un piegamento a 24 m, come discusso nel capitolo 1 (§1.2), che è compatibile con i meccanismi C1 e C2 in Figura 4.3.

Infine, il corpo C3, il cui cinematismo è possibile solo se i corpi profondi di valle sono attivi (come per tutti i Ci), risulta il corpo più instabile di tutti, essendo $\varphi'_{mob} >> \varphi'_{RES}$. L'instabilità profonda configurata da tale corpo, anche se di larghezza pari all'intera scarpata SR-SR2 è inoltre compatibile con tutti i dati di monitoraggio inclinometrico, dato che tale corpo include per intero le tubazioni inclinometriche in scarpata che non sono risultate piegate in profondità, ed altresì non comporta il piegamento della tubazione C15i a valle, coerentemente a quanto rilevato dal monitoraggio. Inoltre, il suo scivolamento è compatibile con spostamenti nell'area abitata alla testa caratterizzati da una componente verticale molto maggiore di quella orizzontale, come verificato dal monitoraggio geomatico (§1.1).

Ne consegue che i risultati delle analisi LEM sin qui discusse, integrate con le interpretazioni desunte sulla base dei dati di sito e discusse nel capitolo 1, appaiono indicare che nel versante sia attivo un processo franoso antico molto profondo che raggiunge al piede l'affluente del vallone del Fico, che mobilizza oggi resistenze operative nelle bande di taglio di poco superiori alla resistenza residua e che ha generato una retrogressione della rottura sino alla scarpata SR-SR2. Tale rottura in scarpata ha ivi configurato un'attività franosa significativa e relativamente profonda, che comporta spostamenti in scarpata di componente verticale molto maggiore rispetto all'orizzontale. Il corpo in scarpata più instabile è infatti il corpo più profondo C3. La mitigazione della sua attività è prevedibilmente complessa e richiede anche la mitigazione dell'attività delle masse franose a valle.

L'effetto della suzione sulla resistenza a taglio risulta essere di minima entità per i corpi profondi P1* e P2 (variazione dell'angolo di attrito mobilizzato di qualche decimo di grado in Tabella 4.2), in ragione della significativa profondità delle superfici di scivolamento, che si sviluppano fondamentalmente nella porzione sottofalda del pendio. Al contrario, si osserva una maggiore influenza della porzione parzialmente satura sopra falda sull'equilibrio dei corpi superficiali M1 e T2 con Meccanismo di tipo 1 (Tabella 4.2) e dei corpi in scarpata Ci con Meccanismo di tipo 2 (Tabella 4.3). Si calcola una riduzione dell'angolo di attrito mobilizzato da 0.5° a 1.3° nel caso in cui si assume l'intero contributo della suzione nella resistenza al taglio, rispetto al caso in cui si trascuri la suzione nella porzione sopra falda (φ'_b =0). Se si ammette che la distribuzione delle pressioni interstiziali imposta con linea piezometrica sia rappresentativa dell'effettivo assetto piezometrico nel pendio, allora gli angoli di attrito mobilizzati dall'equilibrio dei corpi in scarpata C1 e C2, determinati

nell'ipotesi di completa saturazione (φ'_b =0), risultano essere più verosimili rispetto ai valori desunti dall'analisi a ritroso nell'ipotesi di parziale saturazione. Infatti, l'analisi dei gradi di saturazione dei campioni prelevati in sito nelle diverse unità litologiche (§3.4) mette in evidenza che le sabbie meno ritentive della Sub-unità 2a sono caratterizzate da valori di suzione compresi tra 1 e 5 kPa; pertanto, trascurare l'effetto della parziale saturazione sull'equilibrio dei corpi non rappresenta una importante approssimazione. Come detto, l'analisi dei gradi di saturazione nella Sub-unità 2b mostra che tale strato sia caratterizzato da significativi valori di suzione nella stagione invernale (in cui i campioni sono stati prelevati), compresi tra 38 e 70 kPa, indicativo del fatto che lo strato non è completamente sommerso e che il pelo libero non sempre si trova al di sopra del contatto tra la Sub-unità 2a e la Sub-unità 2b. In tal caso, la condizione di equilibrio limite più verosimile è quella rappresentata dagli angoli di attrito φ'_{mob} nel caso $\varphi'_b = \varphi'_{mob}$ in Tabella 4.3. In entrambi i casi, tali corpi in scarpata C1 e C2 risultano essere instabili, in quanto gli angoli di attrito mobilizzati sono superiori alle resistenze disponibili φ'_{res}.

Le variazioni di suzione nella sub-Unità 2b, conseguenti all'infiltrazione delle precipitazioni, possono produrre un abbattimento delle resistenze a taglio lungo le superfici di scivolamento di tali due corpi (variazioni delle resistenze a taglio comprese tra 15 e 30 kPa), comportando locali accelerazioni dei movimenti. Con particolare riferimento ai corpi C1 e C2, che potrebbero essere rappresentativi dell'attività del corpo S2 cartografato in Figura 1.62, la cui superficie di scivolamento è compatibile con i piegamenti dell'inclinometro C9i e con le misure di inclinazione del clinometro CE3 (come descritto nel capitolo 1 della presente relazione), le escursioni di suzione possono essere responsabili dell'instabilità del corpo. Infatti, nell'ipotesi che il corpo C1 si mobilizzi con un angolo di attrito φ'_{mob} di 19.7° e il corpo C2 si mobilizzi con φ'_{mob} di 19.8° nella condizione di completa saturazione (che equivale a non considerare l'effetto della suzione nell'equilibrio - φ'_b=0), l'incremento del fattore di sicurezza nel caso in cui vigano le suzioni è pari, rispettivamente, a 7.8% e 6.6%.

I risultati delle analisi a ritroso LEM fin qui illustrati, ossia i valori dei φ'_{mob}, trascurano l'effetto gravoso che i processi di filtrazione possono indurre sulla stabilità dei corpi di frana. Una più accurata valutazione della stabilità dei corpi deve contemplare il regime di filtrazione in atto nel pendio, per cui nel seguito si illustrano i risultati delle analisi di filtrazione stazionaria condotte con riferimento alla sezione CC, poi implementati in nuove analisi LEM più avanzate.

4.2.2 Modellazione numerica del processo di filtrazione stazionaria

La modellazione numerica dei processi di filtrazione stazionaria nel pendio, che tenga conto delle caratteristiche idrauliche dei terreni e delle condizioni idrauliche al contorno coerenti con l'assetto idrogeologico del versante, ha consentito di ottenere una simulazione bidimensionale del regime piezometrico nel pendio. In particolare, sono state condotte analisi di filtrazione stazionaria mediante il codice agli elementi finiti Seep/w (Geo-Slope International, 2004).

Con riferimento alla sezione CC, il dominio di calcolo è stato discretizzato con elementi triangolari a 6 nodi, come illustrato in Figura 4.5. Le condizioni al contorno idrauliche dei modelli sono state impostate tenendo conto dell'assetto idrogeologico tridimensionale del versante. Sul piano campagna è stata impostata la

condizione di drenaggio libero, mentre alla base del modello è stato assegnato un bordo impermeabile. In corrispondenza dell'intersezione della sezione con l'affluente del vallone del Fico, sulla superficie topografica è stata impostata la condizione di pressione interstiziale nulla, che equivale ad imporre che il pelo libero coincida con il piano campagna. Sul bordo verticale di valle del modello, si è assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni interstiziali, con pelo libero a 5 m dal p.c., coerentemente con quanto riscontrato nel capitolo 8 della I Relazione di II fase e nel capitolo 3 della presente relazione. Ciò ha implicato l'assegnazione di un carico idraulico di 105 m s.l.m. sul bordo verticale di valle.

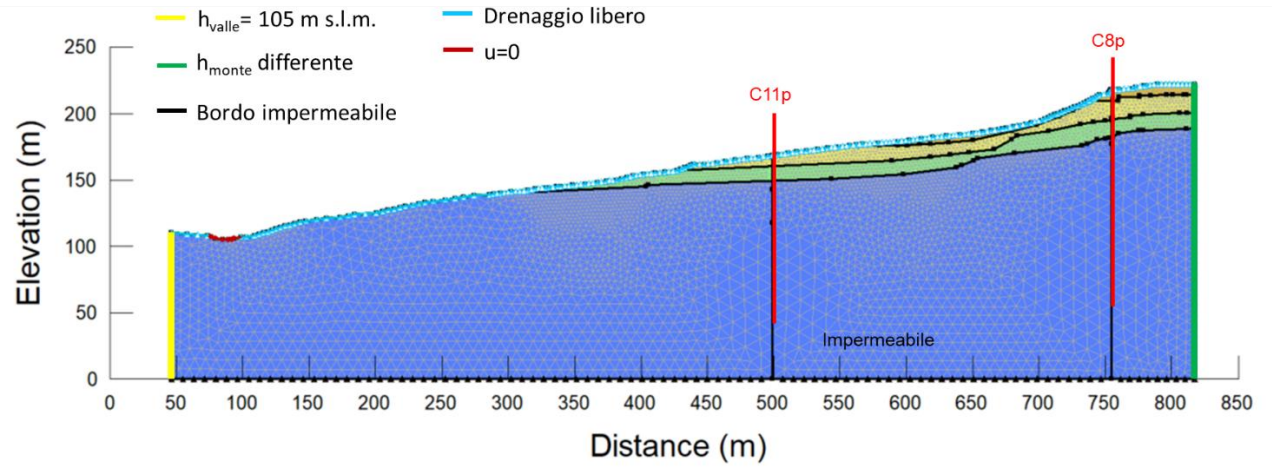


Figura 4.5 Mesh di calcolo e condizioni al contorno idrauliche applicate nel modello numerico FEM per le analisi di filtrazione stazionaria lungo la sezione CC

Sul bordo verticale di monte del modello sono state considerate tre diverse condizioni alternative: una che simula una distribuzione idrostatica delle pressioni interstiziali con pelo libero alla profondità di 20 m dal p.c., coerentemente con il rilievo del pelo libero in situ (carico idraulico pari a 202 m s.l.m. costante con la profondità), e due volte a simulare più fedelmente gli effetti del regime di flusso tridimensionale nel promontorio che, come ricostruito nel capitolo 8 della I Relazione di II Fase e nel capitolo 3 della presente relazione, vede l'alimentazione idrogeologica del promontorio partire da Sud, in modo tale da alimentare la sezione di analisi, ad andamento secondo la massima pendenza nel pendio (esempio sezione CC), anche con flusso in profondità a questa ortogonale.

Per contemplare l'esistenza di un apporto idrico profondo, aggiuntivo rispetto a quello che si possa simulare alimentando con distribuzione idrostatica i bordi verticali del modello bidimensionale, si è applicato lungo il bordo verticale di monte un carico idraulico crescente con la profondità. Sono stati scelti due profili di carico alternativi, riportati in Figura 4.6; nel profilo "scalettato 1" il livello piezometrico varia tra 200 m e 204 m s.l.m., mentre nel profilo "scalettato 2" esso varia tra 205 m e 220 m s.l.m., inducendo nel dominio di filtrazione bidimensionale una maggiore spinta di filtrazione dal basso verso l'alto.

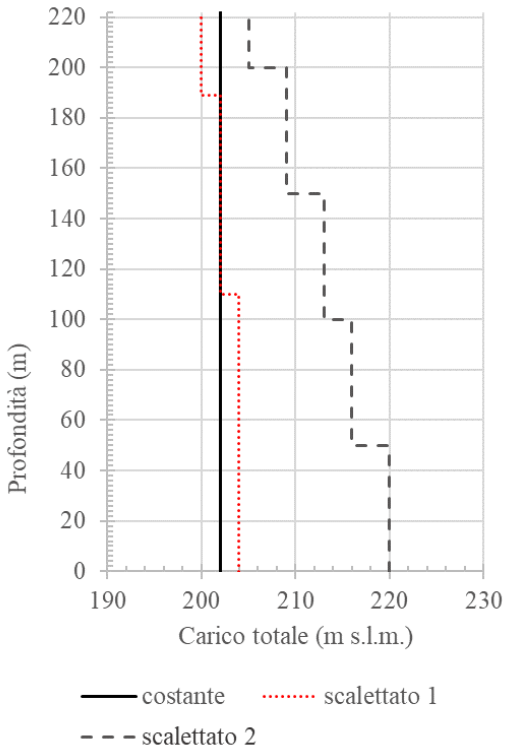


Figura 4.6 Profili del carico idraulico applicato come condizione al contorno di monte nella sezione CC

L'implementazione dei parametri idraulici dei terreni è stata basata sulle prove di permeabilità in sito (§7.4 delle I Relazione di II Fase e capitolo 3 della presente relazione) e in laboratorio, queste ultime eseguite su campioni prelevati lungo vari sondaggi a carotaggio continuo, come descritto nei capitoli 4, 7 e 8 della I Relazione di II fase. In particolare, per i coefficienti di permeabilità satura k_{sat} delle diverse unità sono stati scelti i valori medi dei range di variazione desunti dalle prove sperimentali di laboratorio e di sito, come descritto nei paragrafi 7.4 e 8.1 della I Relazione di II fase e nel precedente capitolo 3. Per l'Unità 1 si è assunto un valore k_{sat} di 5E-11 m/s, essendo l'intervallo di variazione compreso tra 1E-11 e 4E-10 m/s; per la Sub-unità 2a si è assunto k_{sat} pari a 5E-8m/s come valore medio dell'ampio range di variazione, compreso tra 2E-10 e 3E-7 m/s, mentre la Sub-unità 2b si è caratterizzata da una permeabilità di 5E-9 m/s, valore intermedio dell'intervallo 1E-9 −1E-8 m/s. All'Unità 3 è stato assegnato un valore di permeabilità satura pari a 1E-10 m/s, come media nell'intervallo 1E-11 −8E-10 m/s. Occorre aggiungere che sono state svolte numerose analisi parametriche della filtrazione stazionaria cambiando, di volta in volta, i valori di permeabilità satura assegnati ai diversi materiali, ma comunque contenuti nei range di variazione sopra descritti, per individuare la combinazione di valori più consona a determinare livelli piezometrici nel modello coerenti con quelli misurati in sito. Tali analisi parametriche hanno, dunque, indicato quale combinazione di valori di k_{sat} più appropriati quelli dianzi presentati.

Il coefficiente di compressibilità volumetrica m_v, correlato al gradiente della curva di ritenzione per pressioni interstiziali positive, è stato assunto uguale per tutti i materiali del pendio e pari a 1E-7 1/kPa.

La risposta idraulica dei terreni parzialmente saturi sopra il piano di falda è stata simulata mediante le curve di ritenzione, secondo la formulazione di van Genuchten (van Genuchten, 1980) (Eq. 4.3, Figura 4.7a) e le curve di conducibilità idraulica secondo la formulazione di Mualem (Mualem, 1976) (Eq. 4.4, Figura 4.7b):

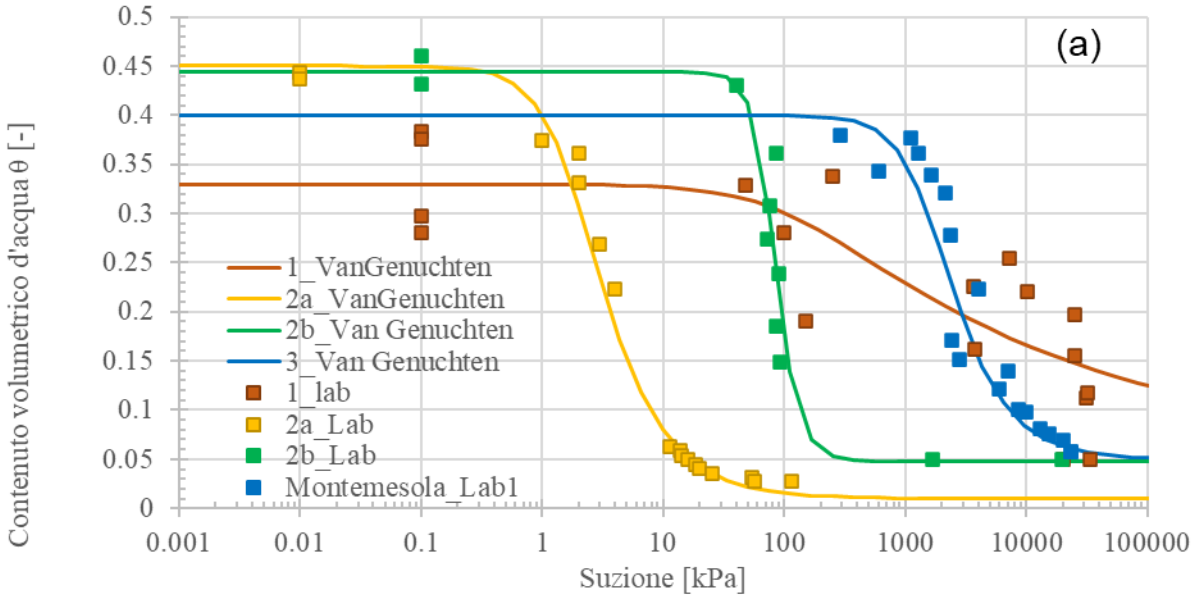
$$\theta_w(s) = \theta_{res} + (\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[\frac{1}{1+(\alpha s)^n} \right]^m \tag{4.3}$$

$$k(s) = k_{sat} \Theta^l \left[1 - \left(1 - \Theta^{1/m} \right)^m \right]^2$$

$$\Theta = \frac{\theta_w - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} = \left[\frac{1}{1+(\alpha s)^n} \right]^m \tag{4.4}$$

dove θ_w è il contenuto volumetrico d'acqua funzione della porosità n e del grado di saturazione S_r secondo la relazione $\theta_w = n \cdot S_r$, θ_{sat} e θ_{res} sono, rispettivamente, il contenuto volumetrico d'acqua saturo e residuo, *a*, *m* e *n* sono parametri di fitting che vanno calibrati sulla base dei dati sperimentali. Nello specifico, la calibrazione dei parametri per i materiali delle unità 1, 2a e 2b è stata eseguita sulla base delle curve di ritenzione di laboratorio ottenute dalle misure sperimentali svolte nel laboratorio G. Melidoro del Politecnico di Bari sui campioni delle succitate unità, discusse nel precedente capitolo 3. Per l'Unità 3, invece, in assenza di misure sperimentali, si è assunto che le proprietà ritentive siano simili a quelle dell'argilla di Montemesola, i cui dati sperimentali sono disponibili in letteratura (Cafaro and Cotecchia, 2015).

Una sintesi dei parametri idraulici adottati nelle simulazioni numeriche è riportata in *Tabella 4.4*.



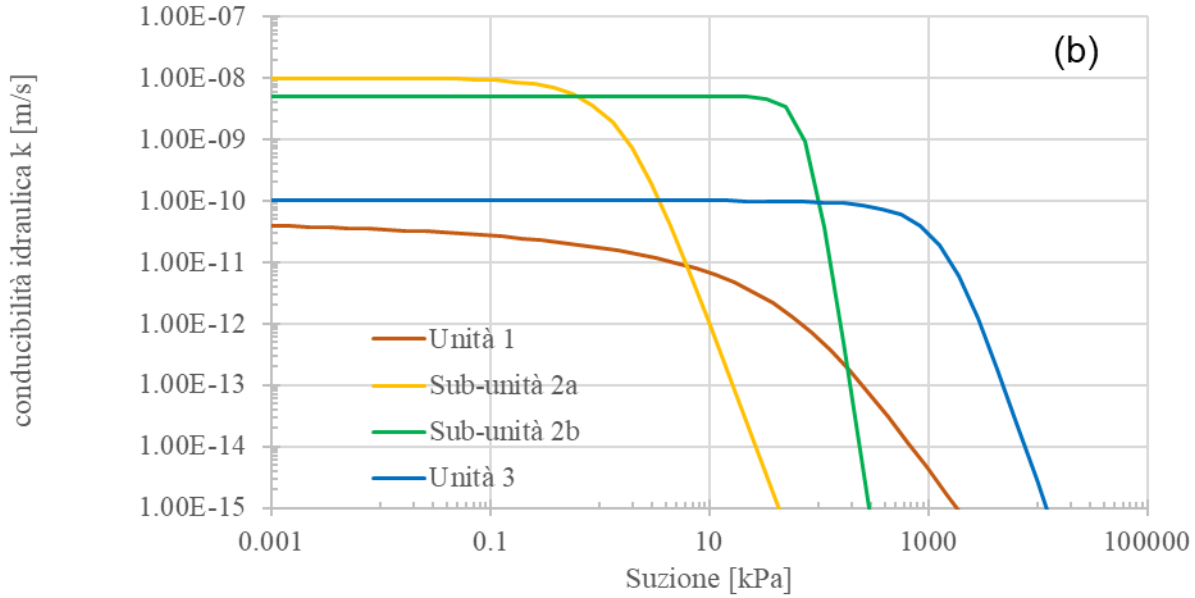


Figura 4.7 (a) Curve di ritenzione confrontate con i dati di laboratorio delle unità litologiche e (b) curve di conducibilità idraulica implementate nel codice Seep/w

Tabella 4.4 Parametri idraulici adottati nelle analisi di filtrazione stazionaria

	θ_{res}	θ_{sat}	$a=1/\alpha$	N	$m=1/n$	l	m_v	k_{sat}
	m^3/m^3	m^3/m^3	-	-	-	-	1/kPa	m/s
Unità 1 dislocata	0.05	0.3297	103	1.192	0.1609	0.5	1.00E-7	5.00E-9
Unità 1	0.05	0.3297	103	1.192	0.1609	0.5	1.00E-7	5.00E-11
Sub- unità 2a	0.01	0.45	1.9	2.1	0.5238	0.5	1.00E-7	1.00E-08
Sub-unità 2b	0.048	0.444	79	4.80865	0.7920	0.5	1.00E-7	5.00E-09
Unità 3	0.05	0.4	1694.9	2.334	0.5716	0.5	1.00E-7	1.00E-10

I risultati delle analisi di filtrazione stazionaria condotte con riferimento alla sezione CC sono riportati in Figura 4.8 in termini di distribuzione delle linee equipotenziali, dei vettori di velocità di flusso e delle linee di flusso nel pendio, per le diverse condizioni idrauliche applicate lungo il bordo verticale di monte. Le analisi mostrano come, indipendentemente dal tipo di carico applicato a monte, il flusso si concentri maggiormente negli strati meno profondi delle sabbie di Serracapriola (sub-Unità 2a e 2b), indicando come lo strato sabbioso favorisca l'allontanamento dell'acqua ed il suo efflusso con carattere sorgentizio al contatto tra la formazione più permeabile, Unità 2, e quella meno permeabile sottostante, Unità 3. Tale efflusso è coerente con la distribuzione di sorgenti lungo tale contatto rilevata in sito e discussa nel capitolo 3. Al contempo, il flusso nell'Unità 2 sommerge l'intera Unità 3, alimentata in profondità anche da Sud.

In Figura 4.8 si osserva, inoltre, come le caratteristiche idrauliche dell'Unità 2, più permeabile rispetto allo strato di argilla profondo dell'Unità 3, contribuiscano a richiamare acqua verso l'alto, qualsiasi sia la condizione imposta a monte tra le tre ipotizzate (Figura 4.6). Il flusso dal basso verso l'alto a monte è amplificato se si simula l'alimentazione idraulica del pendio da Sud (caso 2 in Figura 4.6). Ovviamente,

maggiore è l'intensità del carico di monte, maggiore è la portata di acqua che fluisce all'interno degli strati delle sub-Unità 2a e 2b, come indicato dai vettori di velocità di flusso (frecce nere in Figura 4.8c) in tali strati.

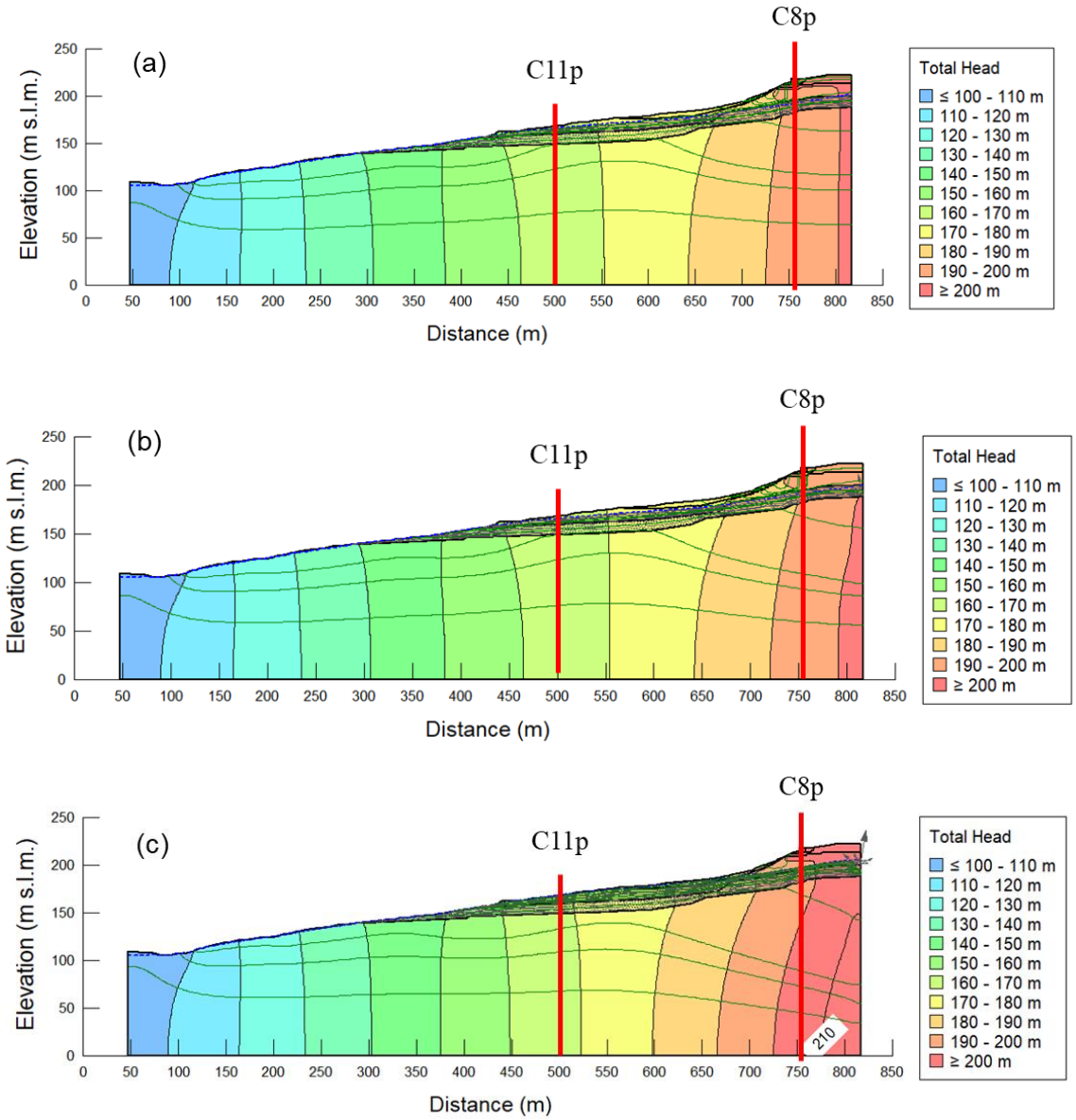


Figura 4.8 Confronto dei risultati delle analisi di filtrazione stazionaria in termini di linee equipotenziali e distribuzione dei vettori di velocità di flusso applicando a monte il carico idraulico (a) costante, (b) variabile tra 200 m e 204 m s.l.m. (scalettato 1) e (c) variabile tra 205 m e 220 m s.l.m. (scalettato 2)

Il confronto dei dati di monitoraggio piezometrico con i profili delle pressioni interstiziali ottenuti dalle simulazioni numeriche lungo le due verticali di indagine C8p e C11p più vicine alla sezione di analisi è riportato in Figura 4.9. Altresì, in Tabella 4.5 sono mostrati i valori delle pressioni interstiziali calcolate numericamente e misurate in sito alle profondità di installazione delle celle piezometriche lungo dette verticali, indicandone anche la differenza, Δu. Occorre sottolineare che il piezometro Casagrande installato a 19 m lungo la verticale C8p non misura una pressione interstiziale positiva, evidentemente poichè collocato in una zona sopra il pelo libero, ma non è stata ivi misurata una suzione in quanto non sono stati installati tensiometri nella

campagna di indagine. Pertanto, nella Figura 4.9 per semplicità si è attribuita u=0 a tale profondità, ove però u potrebbe assumere ivi valore negativo.

I risultati numerici indicano come l'assunzione del profilo "scalettato 2" al bordo laterale di monte del modello numerico, indicativo di un carico idraulico in profondità maggiore che negli strati meno profondi in ragione di un'alimentazione laterale del modello proveniente da Sud, comporti una maggiore sovrastima delle pressioni interstiziali lungo la verticale a metà pendio, C11p, che rispetto a quella a monte, C8p. Inoltre, se il carico lungo il bordo di monte è assunto o costante, o variabile tra 200 m e 204 m s.l.m. (Tabella 4.5), si ottiene una sottostima delle pressioni interstiziali rispetto a quelle misurate dal piezometro profondo nel C8p (a 38.2 m da p.c.). In ogni caso, la modellazione numerica indica la presenza, lungo la verticale a monte C8p, di pressioni interstiziali negative al di sopra di circa 20 m - 26 m di profondità, a seconda della distribuzione di carico totale applicato a monte.

Nella porzione sopra falda, il profilo delle suzioni desunto dalle analisi ha andamento diverso da quello imposto con linea piezometrica (idrostatico), in ragione della filtrazione nei terreni parzialmente saturi. Nell'Unità 1 le suzioni calcolate variano tra 50 kPa e 200 kPa, assumendo valori prossimi a quelli corrispondenti ai gradi di saturazione misurati in sito (50 kPa < s < 300 kPa; Figura 2.30); nella sub-unità 2a, invece, il profilo delle suzioni varia da 0 kPa (essendo il pelo libero al di sopra del contatto tra le sub-Unità 2a e 2b) a 50 kPa, e sono, quindi, superiori ai valori corrispondenti ai gradi di saturazione misurati in tale sub-Unità (0 kPa < s < 5 kPa; Figura 2.30). Val la pena però rimarcare che la valutazione delle suzioni in sito cui si fa qui riferimento è caratterizzata da una significativa incertezza, trattandosi di una sua deduzione in base a misure in laboratorio del grado di saturazione e deduzione della suzione tramite la curva di ritenzione misurata su un solo campione in laboratorio. Una stima affidabile, infatti, avrebbe richiesto l'installazione di tensiometri per misure dirette in situ delle suzioni, che inoltre variano durante l'anno per interazione dei terreni poco profondi con il clima. Si terrà conto nel seguito nella valutazione dell'incidenza delle suzioni sulle resistenze disponibili nelle bande di taglio nei calcoli LEM.

Poiché l'accurata previsione della distribuzione delle pressioni interstiziali dovute ai processi di filtrazione in atto nel pendio è di maggiore interesse nella porzione di monte, coinvolta da intensi fenomeni di instabilità, e in termini cautelativi, si è scelto di valutare l'equilibrio limite dei diversi corpi precedentemente analizzati implementando nelle analisi LEM il regime piezometrico ottenuto mediante l'applicazione del carico idraulico crescente con la profondità tra 205 m e 220 m s.l.m. (scalettato 2), che sovrastima i livelli piezometrici di valori da circa 3 a circa 7m.

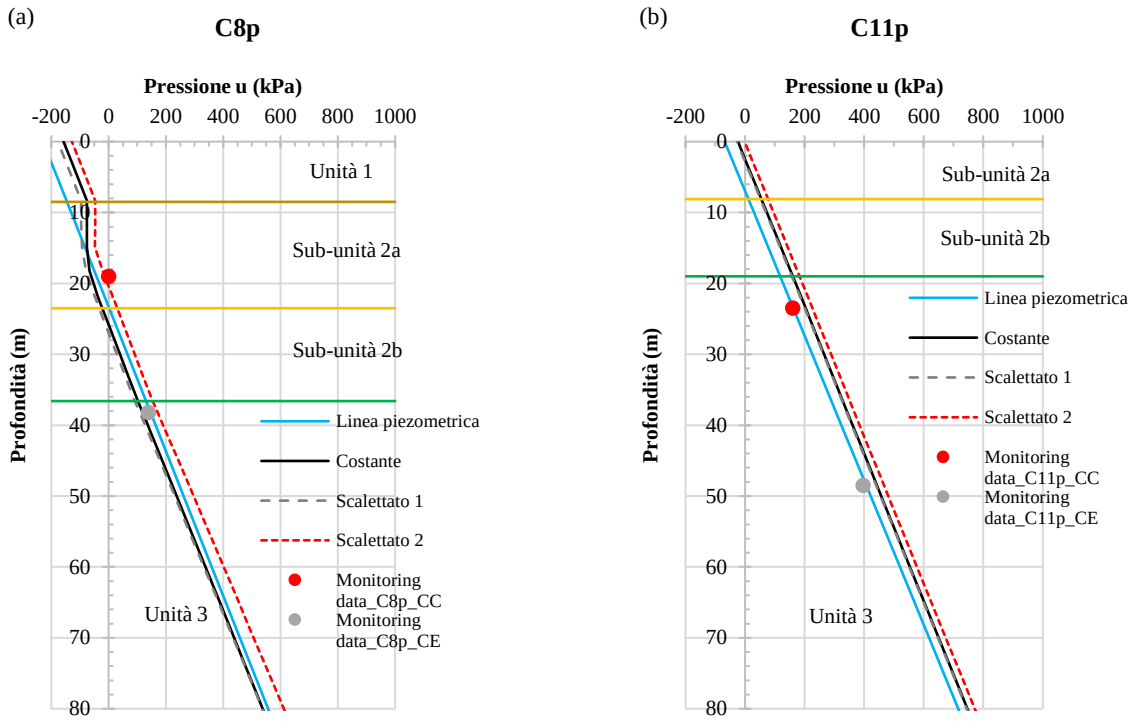


Figura 4.9 Confronto tra i dati di monitoraggio piezometrico e le previsioni numeriche lungo le verticali C8p (a) e C11p (b)

Tabella 4.5 Confronto tra i risultati delle analisi di filtrazione con i dati di monitoraggio piezometrico in termini di pressioni interstiziali

		Monitoraggio in sito	Previsione numerica: bordo laterale monte a carico costante		Previsione numerica: bordo laterale monte scalettato 1		Previsione numerica: bordo laterale monte scalettato 2	
	Profondità da p.c. (m)	Pressione (kPa)	Pressione (kPa)	Δu (kPa)	Pressione (kPa)	Δu (kPa)	Pressione (kPa)	Δu (kPa)
C11p	23.5	160.3	203.9	43.6	200.8	40.5	226.5	66.2
C8p	38.2	139.1	121.9	-17.2	111.9	-27.2	174.7	35.6
C11p	48.5	396.4	445.2	48.8	442.7	46.3	468.8	72.3

4.2.3 Effetto della filtrazione sull'equilibrio dei corpi analizzati

Al fine di valutare le resistenze operative nel pendio in presenza della filtrazione, facendo riferimento specifico alle bande di taglio dei corpi P1* e P2, secondo il Meccanismo di tipo 1, e dei corpi in scarpata Ci, secondo il Meccanismo di tipo 2, sono state eseguite analisi a ritroso LEM implementando la distribuzione delle pressioni interstiziali dedotte dall'analisi di filtrazione con profilo del carico di monte variabile tra 205 m e 220 m s.l.m., ossia con le condizioni al contorno che comportano le condizioni di filtrazione più onerose per la stabilità tra quelle calcolate dianzi. Nella porzione sopra falda della banda di taglio, o superficie di scivolamento nel seguito, la resistenza a taglio è stata espressa con l'Eq. 4.2, impostando φ'_b pari a φ', poiché si è considerato che il profilo delle suzioni dedotto con questo calcolo della filtrazione sia sovrastimato solo nel tratto della sub-Unità 2° e possa essere sottostimato nel tratto di attraversamento della sub-Unità 2b. In ogni caso, come

mostrato in precedenza, l'errore connesso a tale scelta nell'espressione della resistenza al taglio incide poco sul valore della resistenza operativa che si deduce dal calcolo.

Come già descritto nel precedente paragrafo, nella simulazione del Meccanismo di tipo 2 il peso unitario da assegnare al terreno che compone il corpo P1 (sovraccarico distribuito al piede dei corpi Ci), è stato determinato mediante l'espressione 4.1, in cui le aree sono state determinate tenendo conto della posizione del pelo libero risultante dall'analisi di filtrazione. Nella Tabella 4.6, sono sintetizzati i valori delle aree e dei pesi unitari implementati in ciascun calcolo LEM per i corpi Ci.

Tabella 4.6 Valori del peso unitario equivalente γ^* assegnati per il calcolo dell'equilibrio dei corpi in scarpata Ci con filtrazione stazionaria

	corpo C1	corpo C2	corpo C3
A_{tot}	845.19	4113	2955.5
A_1	244.82	395.8	166
A_2	600.37	3717.2	2789.5
γ^*	11.90	9.96	9.56

Gli angoli di attrito mobilizzati, sintetizzati in Tabella 4.7, sono quelli mediamente operativi per ognuno dei corpi analizzati. Si osserva che l'implementazione della filtrazione nel calcolo LEM comporta una stima di maggiore instabilità di tutti i corpi esaminati, per incremento del φ'_{mob} di circa 1° rispetto al valore risultante, per ogni analisi LEM, quando si è adottata la linea piezometrica per la stima delle pressioni interstiziali lungo la superficie di scivolamento (Tabella 4.2 e Tabella 4.3). La motivazione può risiedere, in parte, nella sovrastima delle pressioni interstiziali introdotta nelle analisi con filtrazione, come mostrato nella Figura 4.9 e nella Tabella 4.5. In parte, però, la motivazione può risiedere nel fatto che nel calcolo LEM in presenza di filtrazione si sta contemplando in maniera più realistica la distribuzione piezometrica del regime idrodinamico del pendio, che incide su tutta la distribuzione piezometrica nelle bande di taglio, anche dove non si avevano dati di misura ed ove, dunque, la linea piezometrica è stata solo ipotizzata senza riscontro di campo. Con il calcolo di filtrazione le pressioni interstiziali nel pendio sono, invece, implementate in ragione delle leggi idrodinamiche e delle proprietà idrauliche dei terreni, come anche delle condizioni al contorno scelte sulla base di analisi di sito. Il calcolo LEM in presenza di filtrazione, infatti, va considerato più avanzato di quello in presenza di linea piezometrica.

Tabella 4.7 Resistenze mobilizzate dall'equilibrio dei corpi analizzati lungo la sezione CC - filtrazione stazionaria

MECCANISMO 1		MECCANISMO 2		
CORPO P1* (profondo)	CORPO P2	CORPO C1	CORPO C2	CORPO C3
16.2	15.2	19.9	20	28

Complessivamente, la gerarchia di instabilità tra i corpi esaminati è comunque equivalente a quella desunta dalle analisi LEM con linea piezometrica. Il φ'_{mob} mobilizzato per il corpo P1* profondo, delimitato da una superficie di scivolamento che si sviluppa maggiormente nell'Unità 3, conferma l'attività di tale corpo. Il

processo di filtrazione rende più probabile che il corpo P2 sia attivo, in ragione della resistenza operativa che risulta essere prossima alla resistenza residua dell'Unità 3 entro cui la superficie di scivolamento si sviluppa in maniera predominante (più del 90%). Il corpo in scarpata più instabile di tutti è il C3, che si estende fino alla profondità di circa 60 m.

4.3 Analisi a ritroso dell'equilibrio limite dei corpi P1*, P2 e C3 nelle sezioni CC'

4.3.1 Analisi idraulica e LEM dei corpi di frana

In aggiunta alle precedenti analisi, sono state eseguite analisi dell'equilibrio limite dei corpi P1* e P2 e del corpo in scarpata C3 anche lungo la sezione CC', la cui traccia segue la traiettoria della sezione CC fino alla quota 145 m s.l.m., ma devia seguendo la massima pendenza nella zona di valle, fino ad intercettare e proseguire all'interno dell'impluvio, per tener ancor meglio conto della tridimensionalità della filtrazione nel versante e dell'instabilità in zona di piede (Figura 4.4).

Le analisi LEM del corpo P1* sono state eseguite implementando la distribuzione delle pressioni interstiziali sia mediante imposizione della linea piezometrica, sia in presenza di filtrazione, desunta da nuove analisi in regime stazionario che contemplassero la nuova geometria del modello. Con riferimento alle analisi con linea piezometrica, nella porzione sopra falda della superficie di scivolamento, la resistenza a taglio è stata espressa dall'Eq. 4.2, impostando φ'_b pari a φ'. Queste mostrano che l'angolo di attrito mediamente mobilizzato dall'equilibrio limite del corpo P1*, per come questo risulta intercettato dalla sezione CC', è pari a 15.4° (contro il valore di 14.8° mobilizzato lungo la sezione CC), considerando l'effetto benefico della suzione nella zona di parziale saturazione. Il corpo P1* intercettato dalla sezione CC' è, dunque, maggiormente instabile. Ne consegue che le successive analisi finalizzate alla determinazione delle resistenze operative nelle bande di taglio dei corpi di frana esaminati e alla valutazione dell'efficacia degli interventi di mitigazione del rischio da frana (descritte nel successivo capitolo 7 della presente relazione) sono state eseguite con riferimento alla sezione CC'.

Con lo scopo di valutare con maggiore dettaglio quanto i terreni di ciascuna unità nel pendio contribuiscano, con le loro resistenze disponibili, all'equilibrio dei corpi di frana esaminati, sono state svolte delle analisi a ritroso "di dettaglio", assegnando all'Unità 1 e alle sub-Unità 2a e 2b, la cui resistenza decade, con l'avanzare della deformazione di taglio, dal picco al post-picco nella maggior parte del pendio, ma non raggiunge la resistenza residua se non che in alcune porzioni della sub-Unità 2b, valori del φ' pari a quelli misurati come 'ultimi' nelle prove di laboratorio. Si è, dunque, valutata, con le analisi LEM, il valore la resistenza mobilizzata φ'_{mob} nella sola Unità 3. Si è ancora ipotizzato c'_{mob} nullo, come atteso per gli elevati valori di deformazione occorsi nelle bande di taglio per corpi di frana antichi. Il regime piezometrico desunto dall'analisi di filtrazione stazionaria e implementato nelle analisi LEM è stato, in questo caso, calcolato con il modello riportato in Figura 4.10, discretizzato con elementi triangolari a 6 nodi. Le condizioni al contorno idrauliche sono state impostate tenendo conto dell'assetto idrogeologico tridimensionale del versante, come descritto nel §4.2.2 per la sezione CC. Anche per questa sezione, a piano campagna è stata impostata la condizione di drenaggio libero, mentre il bordo inferiore è stato assunto impermeabile. In corrispondenza dell'intersezione della sezione CC'

con l'affluente del vallone del Fico, a piano campagna è stata impostata la condizione di pressione interstiziale nulla. Sul bordo di valle si è imposto che la superficie di falda coincida con il piano campagna, assegnando un carico idraulico costante pari a 81 m s.l.m., mentre a monte è stato applicato un carico idraulico crescente da 205 m a 220 m s.l.m., che simula il regime di flusso tridimensionale nel promontorio, come mostrato dalla ricostruzione idrogeologica 3D nel capitolo 8 della I Relazione di II fase e nel capitolo 3 della presente relazione. Le caratteristiche idrauliche dei terreni sono quelle descritte nel precedente §4.2.2.

In queste analisi, nella porzione sopra falda, l'incremento della resistenza a taglio dovuta alla suzione è stata quantificata utilizzando le curve di ritenzione ed i parametri efficaci della resistenza del terreno, adottando la formulazione di Vanapalli et al. (1996):

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a)\tan(\varphi') + (u_a - u_w)\left[\left(\frac{\theta_w - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}}\right)\tan(\varphi')\right] \qquad (4.5)$$

dove il contributo della suzione è funzione dell'effettivo contenuto volumetrico d'acqua θ_w.

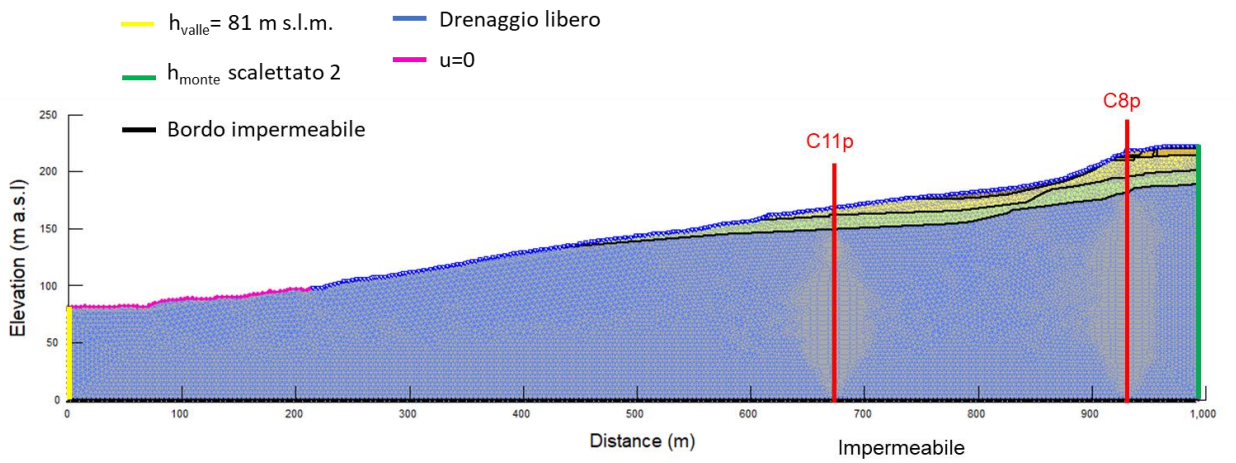


Figura 4.10 Mesh di calcolo e condizioni al contorno idrauliche applicate nel modello numerico FEM per le analisi di filtrazione stazionaria lungo la sezione CC'

I risultati delle analisi di filtrazione stazionaria sono riportati in Figura 4.11, in termini di distribuzione delle linee equipotenziali, dei vettori di velocità di flusso e di linee di flusso nel pendio. Il flusso idraulico si concentra maggiormente nelle sabbie di Serracapriola (Sub-unità 2a e 2b), caratterizzate da maggiore permeabilità rispetto alle argille dell'Unità 3. Inoltre, nella zona al di sotto del paese, il processo di filtrazione è diretto dal basso verso l'alto, in ragione del carico idraulico crescente applicato sul bordo di monte e delle caratteristiche idrauliche dell'Unità 2, come discusso in precedenza. Il pelo libero, a u=0, risultante dalla filtrazione stazionaria si attesta ad una profondità di circa 20 m da p.c. nella zona di monte e a circa 2 m da p.c. per tutta la parte alta del versante, fino al gradino morfologico a metà pendio (scarpata SR0), dove affiora in corrispondenza del piano campagna, coerentemente a quanto osservato in situ. Oltre tale scarpata, il pelo libero si attesta ad una profondità minore di 50 cm da piano campagna, fino al raggiungimento del corpo idrico di valle. Il risultato della simulazione numerica è corroborato dai rilievi di sito; infatti, dove il modello

numerico prevede l'affioramento dei flussi idraulici a metà pendio, in sito si osserva la presenza di una vegetazione di canneti e di efflussi di acqua in superficie (vedasi capitolo 3).

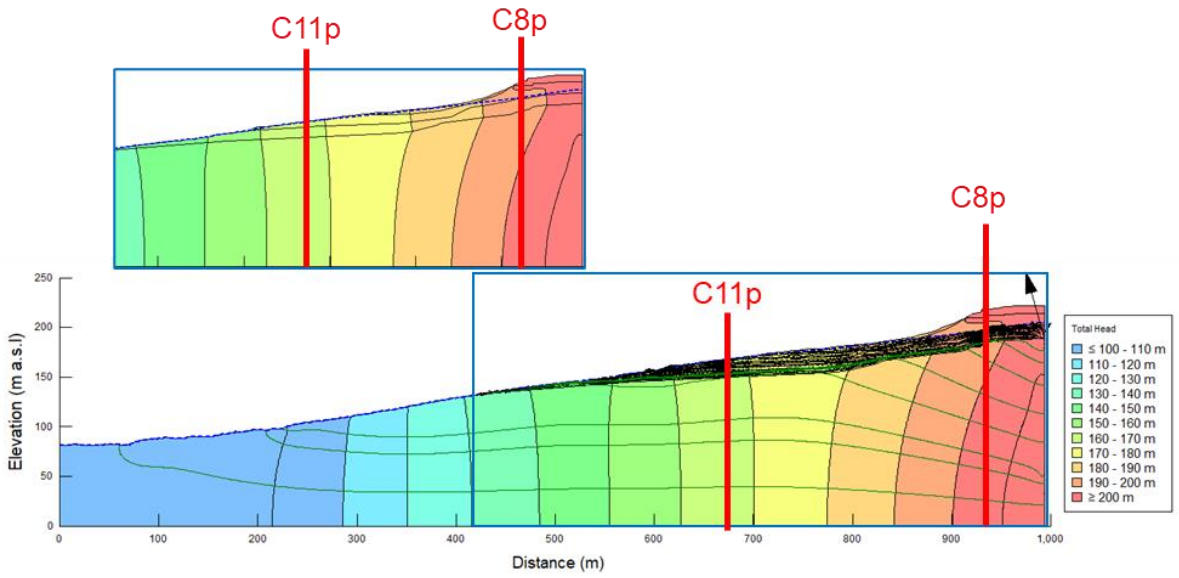


Figura 4.11 Risultato dell'analisi di filtrazione stazionaria in termini di linee equipotenziali, distribuzione dei vettori di velocità di flusso e linee di flusso nella sezione CC′

La Figura 4.12 mostra il confronto dei dati di monitoraggio delle pressioni interstiziali con i profili delle pressioni interstiziali ottenuti dalla simulazione numerica lungo le due verticali di indagine, evidenziando un buon accordo tra previsione numerica e dato di sito, a meno della sovrastima delle pressioni interstiziali lungo la verticale C11p a metà pendio.

Una volta definito il regime delle pressioni interstiziali in condizioni di filtrazione stazionaria, si è proceduto con l'esecuzione delle analisi LEM a ritroso, secondo la metodologia dianzi illustrata.

Come detto, le analisi hanno indagato l'equilibrio dei corpi P1*, P2 e C3. In *Tabella 4.8* è riportata una sintesi dei parametri di resistenza assegnati ai diversi strati nelle analisi a ritroso LEM; in rosso sono riportati i valori dell'angolo di attrito mobilizzato per l'Unità 3 dall'equilibrio dei corpi considerati. Per tutte le analisi a ritroso dei corpi confinati da superfici di scivolamento che si sviluppano anche negli strati superficiali dell'Unità 1 e della sub-Unità 2a, ossia il corpo P1* e il corpo C3, i valori dell'angolo di attrito assegnati a queste unità litologiche si riferiscono ai valori medi delle resistenze ultime, desunti dalle prove di laboratorio descritte nel capitolo 7 della I Relazione di II fase e richiamati nel capitolo 2 della presente relazione. Il parametro di resistenza assegnato all'unità 2b è stato invece assunto pari all'estremo superiore dell'intervallo di variazione dell'angolo di resistenza determinato da prove di taglio diretto ciclico (capitolo 7 della I Relazione di II fase e capitolo 3 della presente). Per la back-analysis dell'equilibrio limite del corpo P2, la cui superficie di scivolamento interessa le sole sub-Unità 2b e Unità 3, alla sub-Unità 2b è stato assegnato il valore dell'angolo di attrito ottenuto da prove di taglio diretto ciclico, mentre è stato back-analizzato quello mobilizzato nell'Unità 3. Infine, per l'equilibrio limite del corpo C3, che interessa tutte le unità litologiche, l'angolo di attrito assegnato alla sub-Unità 2b è rappresentato dal valore medio della resistenza post-picco, volendo ritenere tale

corpo meno antico di quelli a valle, tale per cui gli spostamenti non hanno necessariamente mobilizzato le resistenze ultime nella banda di taglio.

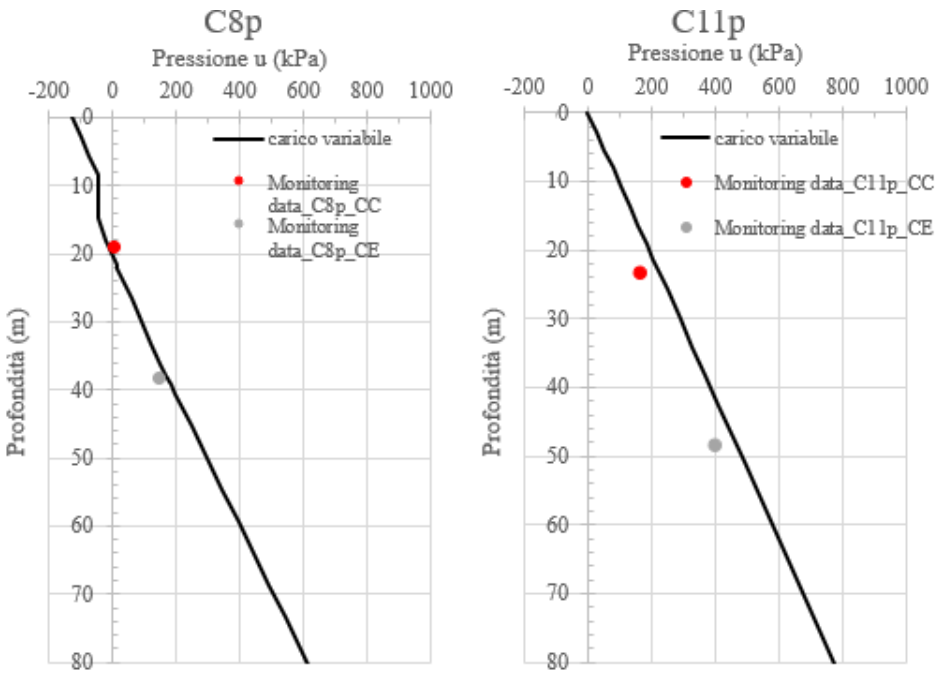


Figura 4.12 Profilo delle pressioni interstiziali con la profondità lungo le due verticali indagate (a) C8p e (b) C11p: confronto con i dati di monitoraggio delle previsioni numeriche ottenute applicando a monte un carico idraulico variabile

Tabella 4.8 Valori degli angoli di attrito assegnati alle unità 1, 2a e 2b e mobilizzati nell'unità 3 dall'equilibrio dei corpi analizzati lungo la sezione CC'

Unità	corpo P1*	corpo P2	cuneo C3
1	22.3	---	22.3
2a	34	---	34
2b	18.7	18.7	26.4
3	16.5	16.4	27.9

I risultati delle analisi in *Tabella 4.8* confermano sostanzialmente quanto già desunto dalla prima famiglia di analisi LEM, condotte implementando la linea piezometrica (§4.2.1), pur se con una differenza interessante. Essi, infatti, evidenziano una maggiore instabilità del corpo P2, che diventa praticamente pari a quella del corpo P1* nel momento in cui se ne contempla con maggiore accuratezza la morfologia tridimensionale nella zona di piede ed il corrispondente assetto idraulico. Questo risultato, quindi, rafforza l'indicazione che vi è instabilità in zona di valle, la quale è fortemente a detrimento della stabilità delle zone a monte.

Con riferimento al corpo C3 a monte, il più instabile, occorre tuttavia ricordare che, vista la strategia di modellazione del meccanismo di rottura di tipo 2 adottata, la sua instabilità può essere sovrastimata dai risultati LEM qui presentati, in quanto si è assunto che il corpo P1 non collabori alla sua stabilità con alcuna spinta orizzontale per resistenza passiva al piede, il che è una semplificazione. In ogni caso, però, pur contemplando le incertezze nella stima dei φ'_{mob}, la congruità dei risultati numerici con l'interpretazione fenomenologica

illustrata nel capitolo 1 rafforza, tramite calcolo meccanico, le conclusioni evinte nel capitolo 1 su base puramente fenomenologica. Queste si riassumono nel riconoscere che nel versante sono attivi dei corpi profondi con piede lungo l'affluente del vallone del Fico. Le scarpate di tali copri sono plurime ed a varie quote: SR0, SRi, SR-SR1, SR-SR2, cui corrispondono i corpi dal P2 al P1*. L'attività di questa retrogressione sino alla scarpata SR2 ha fatto si che oggi siano attivi, con movimenti estremamente lenti, sia i copri antichi a valle, che corpi più recenti profondi ed in scarpata, il cui equilibrio è connesso tuttora a quello degli antichi corpi a valle.

4.3.2 Valutazione delle incertezze nella previsione numerica (MS)

Al fine di valutare quanto le incertezze nella previsione numerica della filtrazione sopra falda possano incidere sul calcolo dell'equilibrio limite dei corpi considerati, si riportano di seguito i profili di suzione (kPa) e del grado di saturazione S_r, al variare della profondità z da p.c., lungo le due verticali d'interesse della sezione CC′, ossia le verticali relative ai sondaggi C8p (boccaforo a 215,5 m s.l.m.) e C11p (boccaforo a 166,1 m s.l.m.), più vicine alla sezione di analisi rispettivamente nella parte di monte e nella parte centrale (V1 e V2 in Figura 4.13). Tali profili, dedotti dalle analisi numeriche, sono stati posti a confronto con i dati di monitoraggio di alcuni campioni indisturbati che ricadono in prossimità delle verticali su citate e che pertanto risultano essere più rappresentativi.

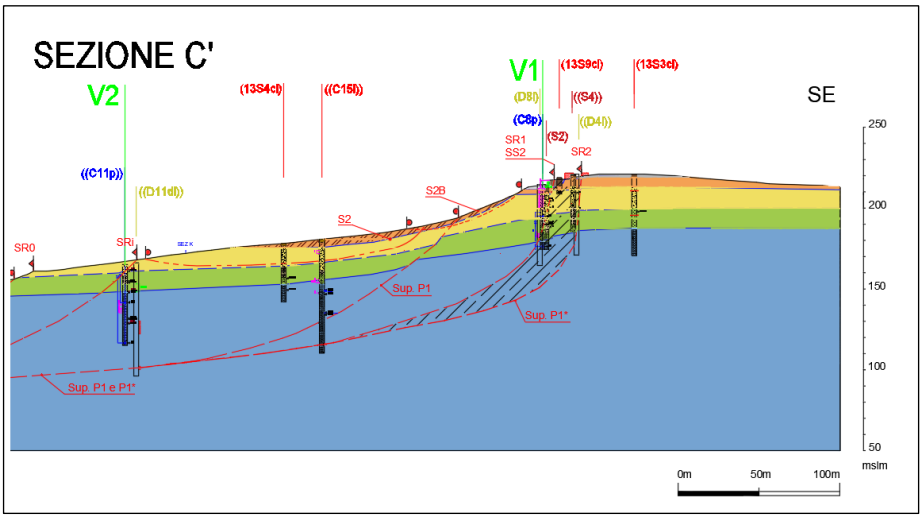


Figura 4.13 Verticali V1 e V2 lungo le quali si è considerato il confronto tra i dati di suzione s (kPa) derivati dal grado di saturazione S_r e quelli dedotti dalle analisi numeriche.

Dal confronto, mostrato nelle Figura 4.14 e Figura 4.15 per la verticale V1 (C8p), in linea generale si riconosce che l'analisi numerica abbia colto l'esistenza di suzioni entro 25-26 m di profondità. Nella parte alta della sub-Unità 2b, che come precisato al §3.4 è sede di campioni per cui sono stati misurati gradi di saturazione corrispondenti a suzione 38 kPa< s <70 kPa (Figura 2.30), il calcolo non prevede che l'acqua sia in suzione, bensì prevede basse pressioni positive (sino a 20-25kPa). Il calcolo, quindi, non può cogliere la presenza di porzioni locali della sub-Unità 2b, di alta capacità ritentiva, che può essere sede di escursioni di suzione, anche

dell'ordine di diverse decine di kPa, al variare del grado di saturazione per l'interazione terreno-vegetazione atmosfera, come discusso più in dettaglio nel capitolo 6.

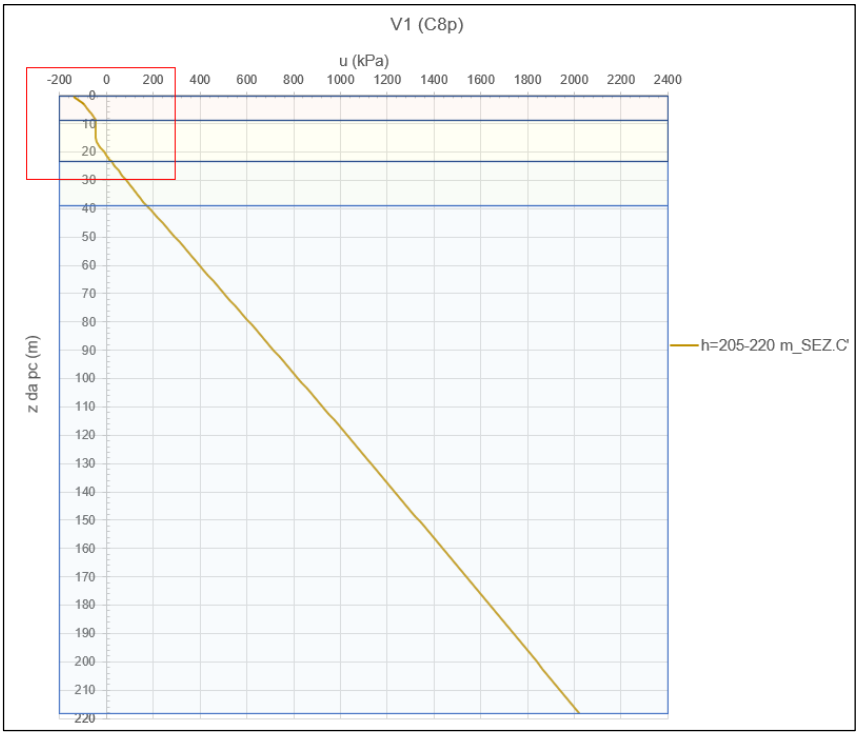


Figura 4.14 Profilo delle pressioni interstiziali u (kPa) con la profondità z da p.c. lungo la verticale V1 (C8p).

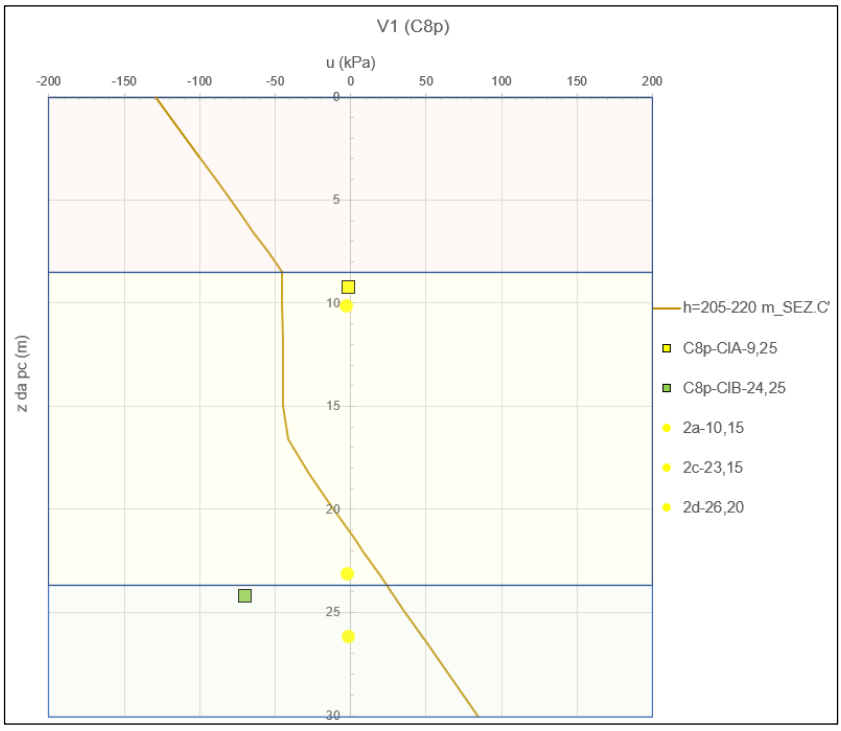


Figura 4.15 Confronto dei dati di suzione s (kPa) di monitoraggio con quelli delle analisi numeriche lungo la verticale V1 (C8p).

Dal confronto dei dati di suzione (kPa) di monitoraggio con quelli delle analisi numeriche lungo la verticale V2 (C11p) presentato in Figura 4.16, si evidenzia per la porzione alta della sub-Unità 2b quanto già dedotto in

precedenza lungo la verticale V1 (C8p), avendo tuttavia a disposizione come unico dato di monitoraggio il valore di suzione del campione indisturbato C11p_CIA e non altri da porre a confronto. Anche in questo caso si coglie una leggera sovrastima delle pressioni, dato che l'analisi numerica non coglie la presenza di suzioni nella parte alta della sub-Unità 2b.

Va precisato che l'incertezza sui valori di suzione che l'analisi numerica pone a fronte di quelli valutati in situ indirettamente dai gradi di saturazione misurati su alcuni campioni in laboratorio, non incide come errore di valutazione delle resistenze sopra falda lungo le porzioni di superficie di scivolamento che interseca terreni parzialmente saturi, data la formulazione adottata per la valutazione della resistenza a taglio nella porzione sopra falda (eq. 4.5; Vanapalli et al, 1996). Le differenze che qui si stanno evidenziando sono messe in luce solo per caratterizzare meglio l'incertezza che riguarda i risultati del calcolo di filtrazione nel suo insieme, sopra e sotto falda sino in profondità.

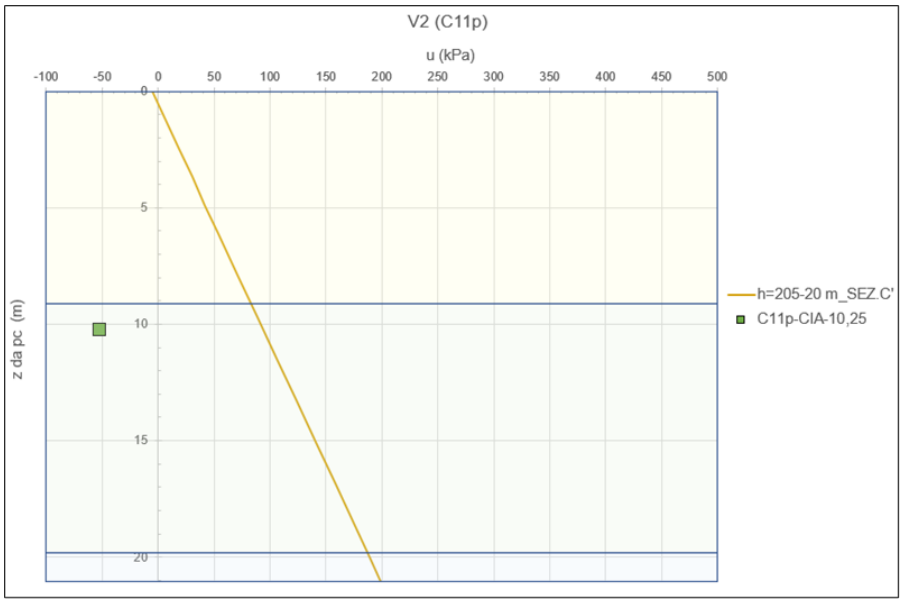


Figura 4.16 Confronto dei dati di suzione s (kPa) di monitoraggio con quelli delle analisi numeriche interazione pendio-vegetazione-atmosfera nel tempo lungo la verticale V2 (C11p).

Inoltre, richiamando le considerazioni esplicitate nel §3.1 e §3.4 del capitolo 3, poiché si possono verificare variazioni di suzione anche dell'ordine di diverse decine di kPa al variare del grado di saturazione dei terreni della sub-Unità 2b per interazione terreno-vegetazione-atmosfera, va considerato che queste escursioni possono contribuire ad accelerare copri poco profondi, con superficie di scivolamento fondamentalmente in tale sub-unità. Ciò può, ad esempio valere per il corpo di frana poco profondo S2 (inclinometro C9i, Figura 1.43, capitolo 1).

5 VERIFICA DEL MECCANISMO DI FRANA TRAMITE MODELLAZIONE NUMERICA DELLA STORIA GEOLOGICA DEL VERSANTE

Nel presente capitolo è descritta l'attività di modellazione numerica, condotta con il metodo degli elementi finiti (FEM), volta a simulare le condizioni di primo innesco del processo franoso verificatosi nel passato geologico, da cui è scaturita la paleo-frana tuttora attiva nel versante occidentale di Chieuti, coerentemente con la storia geologica ricostruita per l'intera valle ad ovest dell'area urbanizzata, discussa nel §5 della I Relazione di II Fase.

In particolare, lo scopo della modellazione numerica di seguito descritta è stata la verifica dell'ipotesi, avanzata su base fenomenologica, che l'erosione della valle del fiume Bivento, evolutasi in maniera asimmetrica nel Medio Pleistocene, sia stata responsabile dell'innesco delle bande di plasticizzazione al piede del versante, nella porzione oggi sede del fosso del Fico. Da tale innesco è poi scaturita la retrogressione profonda delle bande di taglio e la loro diversione, atta a circoscrivere i corpi di frana profondi, schematicamente P2, P1 e P1*, quest'ultimo per retrogressione della banda di taglio sino alla cresta del promontorio (scarpata SR2) in Figura 1.62 del capitolo 1 della presente relazione.

5.1 Strategia di modellazione numerica adottata

Le analisi numeriche sono state svolte in condizioni bidimensionali, con l'ausilio del software Plaxis 2D 2022, atto all'integrazione agli elementi finiti (FEM) in termini idro-meccanicamente accoppiati, delle equazioni di campo che controllano la risposta al finito dei sistemi geotecnici composti da terreno. Il campo di spostamenti in seno al sistema geotecnico è computato nel quadro della meccanica del continuo, nel cui contesto il terreno è modellizzato quale continuo equivalente ad un mezzo poroso plurifase (composto da una fase solida, da una fase liquida ed una gassosa che coesistono nei pori se il terreno è in condizioni di parziale saturazione), la cui risposta è controllata dallo stato tensionale efficace (combinazione delle tensioni totali, della pressione del liquido e di quella del gas presente nei pori) in base a leggi costitutive non lineari, formalizzate nel quadro dell'elastoplasticità (Zienkiewicz & Taylor, 1989; Potts & Zdravković, 1999; Bentley, 2022).

Data la finalità della modellazione, le analisi numeriche implementano le condizioni geo-idro-meccaniche caratterizzanti lo stato del versante occidentale di Chieuti pre-frana, ossia antecedenti l'innesco di alcun processo di snervamento o plasticizzazione nel sistema.

Pertanto, l'analisi numerica è stata condotta imponendo una sequenza di azioni rappresentative dell'intera storia geologica del versante (§5 della I Relazione di II Fase). A tal fine, sono state selezionati i fenomeni occorsi durante la storia geologica che maggiormente hanno determinato variazioni nell'equilibrio del sistema e controllato la sua evoluzione tenso-deformativa, ove con sistema si fa qui riferimento al versante occidentale dal Pleistocene Medio ad oggi. Dunque, la modellazione è stata volta a simulare solo i processi geologici che hanno maggiormente determinato modifiche nelle condizioni di carico lungo il versante o modifiche nella distribuzione dei carichi idraulici nel sistema, quindi nella distribuzione delle pressioni interstiziali. Nella

ricostruzione geologica si ritenuta essenziale la modellizzazione dello scavo vallivo dal Pleistocene Medio ad oggi, con la corrispondente evoluzione dell'assetto idrogeologico del sistema.

Dovendosi simulare l'evoluzione del sistema a partire dal Pleistocene Medio, si è dovuto definire un modello geotecnico che fosse il più possibile rappresentativo delle condizioni del sistema in tale fase geologica. Si è quindi definita la geometria del sistema nella fase antecedente lo scavo della valle del fiume Bivento e la corrispondente stratigrafia geotecnica. Gli strati rappresentativi delle unità presenti nel versante, 1, 2 (2a e 2b) e 3, sono state caratterizzate tramite parametri meccanici (coerenti con la legge costitutiva implementata nell'analisi numerica) propri del terreno intatto (pre-rottura), e parametri idraulici rappresentativi sia delle condizioni di totale saturazione, sia di parziale saturazione.

Il regime idraulico nel pendio è stato modellizzato come stazionario nella gran parte delle fasi di scavo che hanno portato alla genesi del pendio, e come transitorio nelle ultime fasi di scavo, come di seguito meglio dettagliato.

I risultati della modellazione numerica sono stati poi confrontati con i risultati dei rilievi in sito, dei monitoraggi e delle analisi dell'equilibrio limite, discussi nei capitoli precedenti. In particolare nel seguito si discuterà il confronto tra i risultati della modellazione numerica in termini di pressioni interstiziali con i dati dei rilievi piezometrici in prossimità della sezione bidimensionale modellizzata. Si anticipa che questo confronto ha consentito di verificare che la distribuzione delle pressioni interstiziali nel modello numerico è risultata coerente con i dati di situ. La distribuzione dei volumi di terreno che risultano a snervamento (o punti plastici) al termine della modellazione numerica è stata invece confrontata con la distribuzione delle bande di taglio in profondità, queste ultime ricostruite sulla base dell'ampio database discusso nel capitolo 1 (Figure da 1.35 a 1.54) e dei risultati delle analisi LEM del capitolo 4. Nel seguito si discute come questo confronto consenta di verificare la coerenza tra la localizzazione della plasticizzazione (ossia della deformazione) evinta dalla modellazione con l'andamento delle bande di taglio desunto nel capitolo 1, il che corrobora la ricostruzione del meccanismo franoso discussa nei capitoli 1 e 4 della presente relazione.

5.2 Sintesi dei processi geologici modellizzati e sezione di calcolo

Un'approfondita disamina della storia e dei processi geologici che hanno avuto sede nell'area in cui si colloca il versante occidentale di Chieuti è stata esposta nel capitolo 5 della I Relazione di II Fase (Tabella 5.1). Da tale disamina è conseguito il riconoscere che i processi geologici più rilevanti ai fini della modellazione della prima rottura nel versante e della sua retrogressione siano stati fondamentalmente tre (Tabella 5.1): 1) quello di sedimentazione marina e normal-consolidazione delle unità, in sequenza nel tempo 3, 2 ed 1; 2) la successiva emersione per sollevamento delle tre unità, che ha comportato un possibile prosieguo della normal-consolidazione dei terreni per approfondimento del pelo libero al di sotto del piano campagna; 3) la successiva erosione ad opera del reticolo idrografico superficiale, che ha generato uno scavo vallivo, definendo la topografia del versante prima dell'instabilità.

Si rimarca che, ove l'emersione dei depositi rispetto al livello mare è avvenuta per sollevamento tettonico, tale processo non è stato modellizzato se non che in termini di variazione dei carichi idraulici e connesso prosieguo della normal-consolidazione monodimensionale dei terreni, per approfondimento del pelo libero sotto il piano

campagna e corrispondente riduzione delle pressioni interstiziali. Qualsivoglia processo di compressione tettonica laterale, ritenuto comunque blando nell'area qui di riferimento, è stato trascurato, come è stato anche trascurato il leggero basculamento delle unità verso Nord-Est. La modellazione è stata però fedele alla ricostruzione geologica nell'assumere come trascurabile il rigonfiamento monodimensionale dei terreni prima dello scavo vallivo, assumendo, quindi, i terreni nel pendio o normalmente consolidati o leggermente sovra-consolidati, coerentemente con quanto osservato in laboratorio (risultati delle prove di compressione edometrica e risultati delle prove di taglio). Quindi, nella modellazione del sistema non si sono simulate fasi di erosione uniformemente su tutta la sezione, tali da comportare scarico edometrico. Viceversa, lo scarico è stato applicato dopo l'emersione in modo tale da configurare lo scavo vallivo (scarico laterale dei terreni ancora a bassi OCR).

Tabella 5.1 Processi geologici contemplati nell'analisi numerica.

Fase		**Epoca geologica**	**Inizio [milioni di anni fa]**
Sedimentazione	Unità 3	Pliocene superiore – Pleistocene inferiore	3,6 – 1,806
	Unità 2b	Pleistocene inferiore	1,806
	Unità 2a	Pleistocene inferiore	1,806
	Unità 1	Pleistocene medio	0,781
Sollevamento tettonico (emersione Unità)		Pleistocene medio - Olocene	0,781 - 0,01143
Erosione	Valliva asimmetrica	Pleistocene superiore – Olocene	0,126 – 0,01143
	Longitudinale fosso Fico	Olocene	0,01143

Per quanto riguarda la fase di sedimentazione, si rimarca che questa è stata ricostruita schematicamente come normal-consolidazione edometrica di una sequenza di strati rappresentativi delle unità, in cui si è impostato un coefficiente di spinta a riposo, $K_0=\sigma'_h/\sigma'_v$, coerente con la condizione di normale consolidazione ($K_0<1$).

La fase 3 di erosione valliva ha determinato un importante scarico laterale, che ha comportato la formazione del versante occidentale dell'abitato, oggi sede della franosità oggetto di diagnosi nel presente studio. In particolare, la fase erosiva è stata ricostruita come potenzialmente divisa in due differenti processi: il primo corrispondente alla vera e propria fase di erosione valliva asimmetrica operata dal fiume Bivento sino a quando questo ha raggiunto la sua attuale posizione spaziale, come schematizzato in Figura 5.1; il secondo di erosione lungo gli impluvi secondari affluenti del fiume Bivento, ovvero il fosso del Fico ed i suoi affluenti di monte (Figura 5.2).

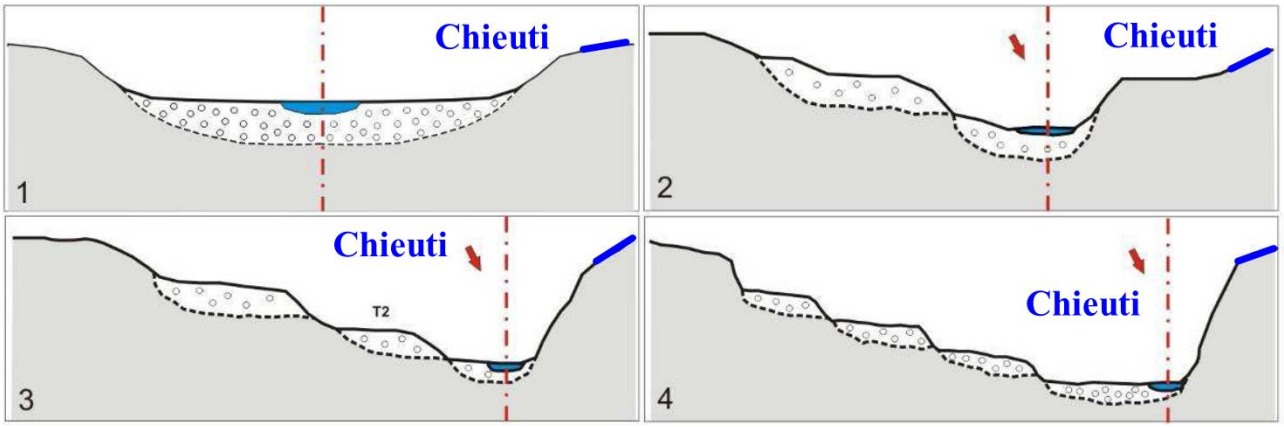


Figura 5.1. Modello schematico evolutivo dell'erosione valliva asimmetrica ad opera del fiume Bivento, con conseguente down-cutting verso Est.

La necessità di modellizzare il processo geologico di erosione valliva ha implicato l'estensione della sezione di calcolo sino alla possibile posizione iniziale del fiume Bivento, all'inizio dell'erosione fluviale, presunta sulla base di considerazioni geologiche a scala regionale (capitolo 5 della I Relazione di II Fase).

In particolare, in Figura 5.2 è riportata una ortofoto dove è visibile la posizione attuale del fiume Bivento e dei suoi affluenti. La figura riporta altresì l'andamento assunto per il Bivento all'inizio della fase erosiva modellizzata con l'analisi numerica. Inoltre, la figura mostra il contorno schematico del processo franoso rilevato nel versante sotto Chieuti e la traccia (in nero) della sezione di calcolo. Tale sezione segue la massima pendenza del versante e devia lungo il ramo meridionale del fosso del Fico, seguendo poi tale fosso fino alla sua intersezione con il fiume Bivento (originale, tratteggiato in ciano nella figura, o attuale, tratto continuo in ciano; Figura 5.2).

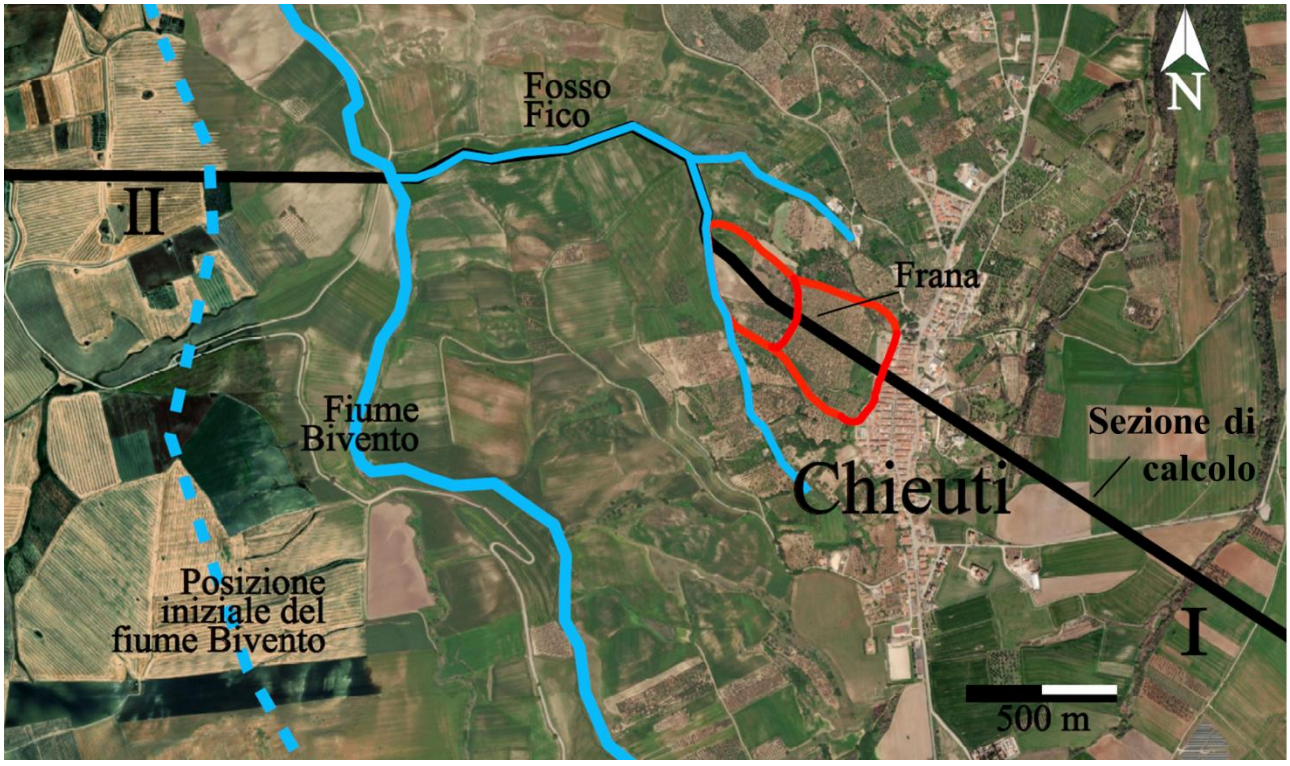


Figura 5.2. Ortofoto dell'area d'interesse, con indicazione del reticolo idrologico in azzurro, la posizione di Chieuti, i contorni dei corpi di frana principali attivi, in rosso, e traccia della sezione bi-dimensionale di analisi (I-II) in nero.

La geometria della sezione all'inizio del calcolo è stata ipotizzata avere estradosso orizzontale, dovendo configurare il deposito in fase di normal-consolidazione. A partire da questa configurazione si è, dunque, simulato lo scavo asimmetrico, sino al raggiungimento della topografia attuale della valle, curata soprattutto per il versante occidentale. La sezione è stata estesa sino al Bivento e non oltre (Figura 5.3). Si è infatti assunto che il bordo verticale occidentale della sezione fosse situato lungo la verticale passante per il Bivento originale, pre-migrazione dovuta allo scavo. Tale bordo è stato vincolato in modo tale da essere sede di spostamenti solo verticali.

Nella sezione si sono impostati 4 strati orizzontali, ognuno corrispondente ad una delle unità geotecniche individuate nel versante, assunte ognuna di spessore costante ed in condizioni tenso-deformative iniziali di tipo edometrico, inizializzate con K_0 di materiale normalmente consolidato, con distribuzione idrostatica delle pressioni interstiziali (falda a piano campagna).

Dopo la consolidazione edometrica, è stata modellizzata la fase erosiva. Questa è stata analizzata secondo due alternative evoluzioni dello scavo, di diversa gravosità per la stabilità del versante; la configurazione 1, più gravosa, è illustrata in Figura 5.4, la meno gravosa configurazione 2 è illustrata in Figura 5.5. In particolare, alla fine dell'erosione valliva asimmetrica che comporta lo spostamento del letto fluviale del Bivento verso ovest sino alla posizione attuale, come mostrato nelle Figura 5.6Figura 5.7 per le configurazioni di scavo 1 e 2 rispettivamente, è seguita una fase di stasi, cui è poi seguita l'erosione eliminando gli ulteriori cluster mostrati nelle figure citate.

Vanno, infine, evidenziate due semplificazioni adottate nella modellazione. La prima, poco incidente sui risultati, riguarda l'aver trascurato il leggero piegamento degli strati durante il sollevamento del promontorio, che, come detto, è stato un processo non implementato nella modellazione. La seconda consiste nell'aver modellato quale profilo topografico al termine dello scavo quello attuale, che invero è un profilo post-frana, quindi caratterizzato da una energia di rilievo inferiore a quello antecedente la mobilizzazione della paleofrana. Si deve dunque considerare che nella modellazione si sono sottostimate le azioni instabilizzanti al termine dello scavo, che sono state invece superiori a quelle modellizzate, dato che il modello ha assunto un profilo topografico del pendio meno acclive di quello raggiunto prima dell'innesco del processo franoso. Quindi, il processo di rottura che l'analisi numerica stima va considerato meno gravoso di quello realmente occorso nella storia del pendio.

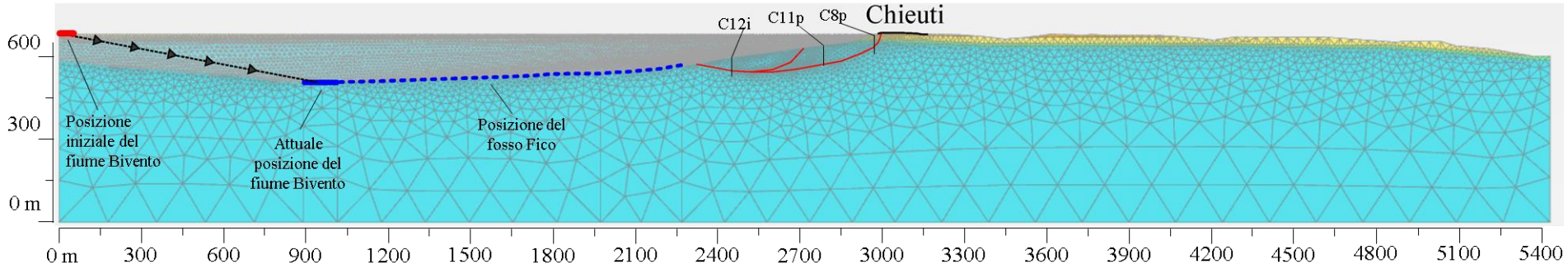


Figura 5.3. Sezione di calcolo FEM con le posizioni iniziali e finali del fiume Bivento e il suo percorso di migrazione, con la posizione del fosso Fico; sono altresì indicati l'andamento delle superfici di scivolamento e le verticali di monitoraggio a ridosso della sezione. Sulla destra è riportato uno zoom della porzione di monte del versante, con le diverse unità modellate e i cluster eliminati per la modellazione del processo di erosione.

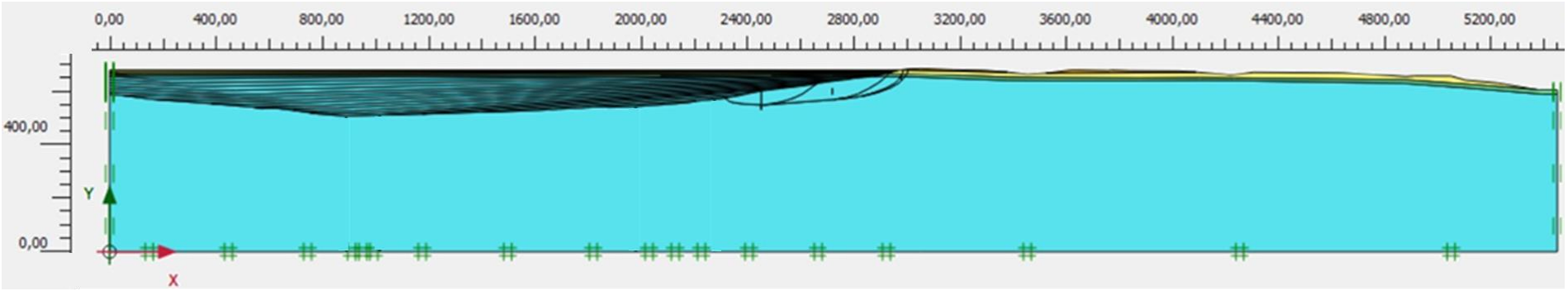


Figura 5.4. Cluster di scavo secondo la configurazione erosiva 1.

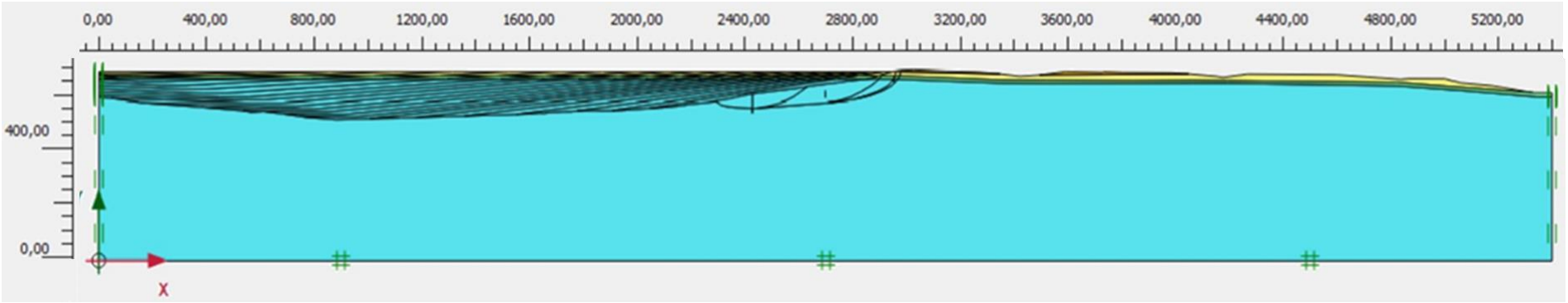


Figura 5.5. Cluster di scavo secondo la configurazione erosiva 2.

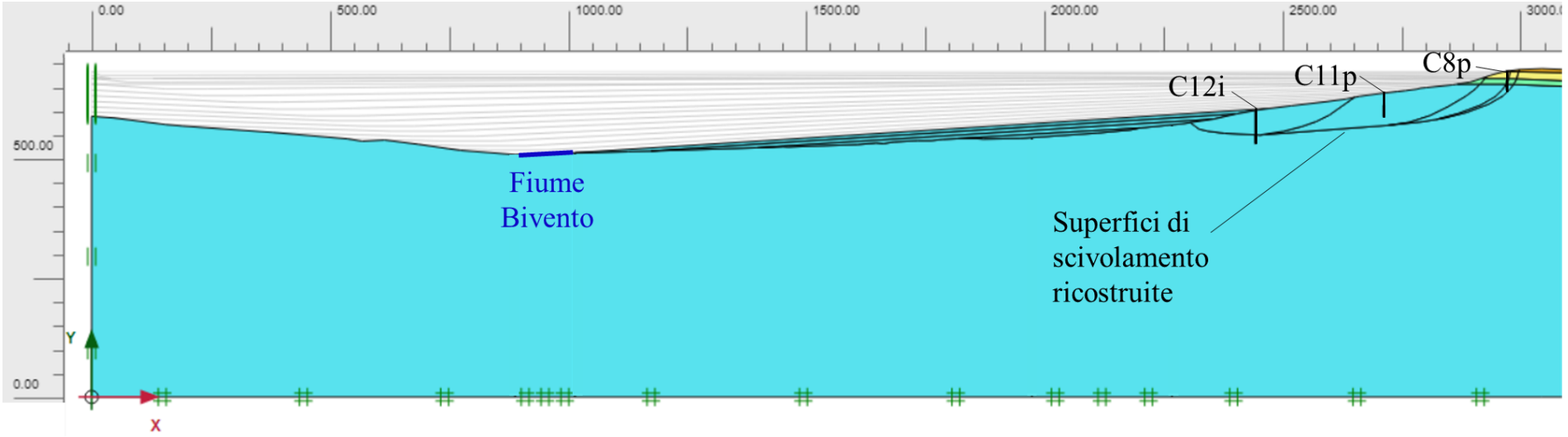


Figura 5.6. Profilo longitudinale al termine dei primi sedici step di calcolo con filtrazione stazionaria - configurazione erosiva 1.

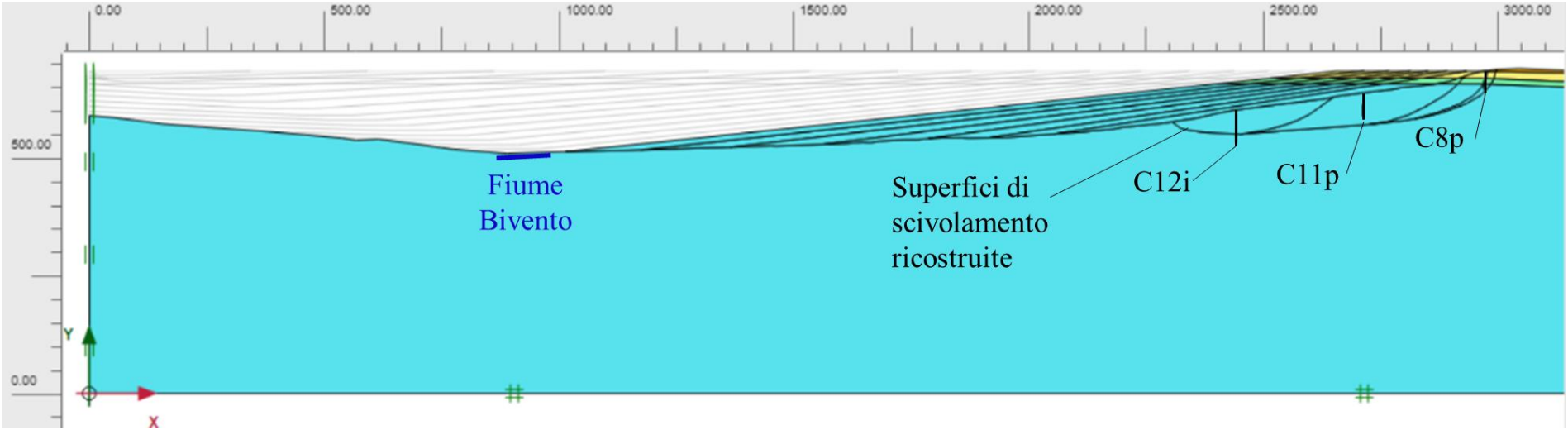


Figura 5.7. Profilo longitudinale al termine dei primi sedici step di calcolo con filtrazione stazionaria - configurazione erosiva 2.

5.3 Modello geotecnico, mesh, condizioni al contorno e fasi di calcolo

Il modello geotecnico del pendio implementato nell'analisi, definito secondo tutte le considerazioni esposte dianzi, è quello mostrato in Figura 5.3.

La legge costitutiva adottata per il comportamento meccanico dei terreni parte delle unità geotecniche che formano il modello è la legge elasto-plastica di Mohr-Coulomb (non incrudente). I valori dei parametri meccanici ed idraulici dei terreni sono riportati nella Tabella 5.2. Si evidenzia che i terreni, allorquando sopra falda, sono stati simulati come parzialmente saturi, coerentemente alla loro legge di ritenzione e di conducibilità idraulica, già commentata nel capitolo 3 ed adottata nelle analisi della filtrazione stazionaria nel capitolo 4.

Tabella 5.2 Parametri idro-meccanici implementati nell'analisi numerica.

Proprietà	**Unità 1**	**Unità 2a**	**Unità 2b**	**Unità 3**
Peso per unità di volume saturo, γ_{sat} [kN/m^3]	20	20	20	20
Permeabilità satura, k_{sat} [m/s]	$1*10^{-9}$	$1*10^{-8}$	$1*10^{-9}$	$1*10^{-10}$
Modulo di Young, E′ [kPa]	30000	30000	30000	30000
Coefficente di Possion, ν′ [-]	0.3	0.3	0.3	0.3
Coesione intercetta, c′ [kPa]	15	5	15	5
Angolo d'attrito efficace, ϕ′ [°]	20	32	26	20
Grado di saturazione satura ad u=0, S_{sat} [%]	1.0	1.0	1.0	1.0
Grado di saturazione residuo, S_{res} [%]	0.1368	0.0222	0.1082	0.1368
Parametro di van Genuchten, g_n [-]	1.2	2.7	7.4	1.2
Parametro di van Genuchten, g_a [-]	0.05	3.9	0.11	0.05
Parametro di van Genuchten, g_l [-]	0.5	0.5	0.5	0.5

Specificamente, le proprietà ritentive delle quattro unità sono state simulate con il modello di Mualem-van Genuchten, i cui parametri sono stati calibrati su dati in wetting e drying ottenuti in laboratorio come descritto dettagliatamente nel capitolo 3.

Si precisa che rilevante impatto sulla modellazione numerica, ed in particolare sulla potenziale localizzazione della plasticizzazione e delle deformazioni nel modello, è rivestito dalle proprietà meccaniche dell'Unità 3, sede dell'innesco delle bande di taglio. L'adozione della legge di Mohr Coulomb non incrudente, ha comportato, come approssimazione, il non poter integrare nella modellazione la fase di incrudimento negativo (rammollenza) dei materiali. Si evidenzia ciò non tanto con riferimento al decadimento di resistenza del materiale dal picco al post-picco, dato il basso grado di sovraconsolidazione delle argille per cui queste esibiscono comportamento poco rammollente alle grandi deformazioni per cui si contempli ancora una continuità del materiale. Invece va considerato che il decadimento di resistenza di queste argille investe le grandissime deformazioni che portano alla lacerazione e alla resistenza residua, decadimento che non è stato implementato nelle analisi. Per compensare questa negligenza i parametri meccanici di snervamento c′ e ϕ′ dell'Unità 3 sono stati posti di valore leggermente inferiore rispetto a quelli di picco, ottenuti dalle prove triassiali effettuate in laboratorio e descritte nel capitolo 7 della I Relazione di II Fase. Essi sono stati infatti

assunti intermedi tra il valore di picco ed il valore a residuo. Un simile approccio è stato adottato, anche se in maniera meno marcata, per le altre unità, per le quali i valori dei parametri c′ e ϕ′ implementati sono solo poco inferiori a quelli medi che caratterizzano la condizione di picco, dato che in particolare per la sub-Unità 2° non si osserva il decadimento di resistenza a residuo.

5.3.1 Geometria del modello e mesh di calcolo

Il modello geotecnico rappresentato Figura 5.2 si estende dalla Masseria Bivento verso est fino all'impluvio successivo, in corrispondenza del Bosco Monacesca, attraversando l'abitato di Chieuti.

Come anticipato, coerentemente con il processo di consolidazione monodimensionale delle varie unità, si è implementato uno spessore pressocchè costante per ognuna di esse. In particolare, lo spessore dell'Unità 1 è pari a circa 6m, quello della sub-Unità 2a è pari a circa 20m, mentre per la sub-Unità 2b lo spessore è pari a 10m. L'Unità 3 è stata poi estesa fino alla base del modello, collocata a circa -450 m sul livello medio del mare.

La Figura 5.3 riporta anche la mesh di calcolo adottata, che è caratterizzata da 18937 elementi triangolari e da 152695 nodi.

5.3.2 Fasi di calcolo e condizioni al contorno

Come già anticipato, le fasi di calcolo fondamentalmente vedono la consolidazione mono-dimensioale e, successivamente, la fase di scavo per erosione valliva (Figura 5.3).

La fase di normale consolidazione è stata eseguita adottando una procedura k_0 di generazione degli sforzi, con un valore di k_0 iniziale pari a 0,65 per tutte le unità (ritenuto rappresentativo di una condizione di normale consolidazione), imponendo da subito la condizione di regime stazionario idrostatico, con pelo libero circa a piano campagna.

Successivamente ha avuto inizio la fase di scavo, condotta secondo le due configurazioni differenti (Figura 5.4Figura 5.5). In entrambi i casi, lo scavo è stato modellato eliminando cluster successivi e svolgendo un calcolo plastico in condizioni drenate (durata geologica dello scavo vallivo, di circa 780000 anni; Tabella 5.1) per ogni passo di scavo. La filtrazione è stata condotta assumendo sempre pressione nulla a piano campagna in corrispondenza del letto del fiume Bivento, che è migrato con ogni step di scavo. Si evidenzia che le due configurazione erosive si differenziano fondamentalmente per la pendenza dei cluster di terreno erosi ad ogni step di scavo.

Nella configurazione 1 (Figura 5.4Figura 5.6) gli scavi effettuati ad ogni step di calcolo hanno una pendenza pari a 2 gradi; pertanto, avendo fissato la pendenza del profilo topografico in destra idraulica del fiume Bivento, nella modellazione si è verificato il raggiungimento dell'attuale posizione del fiume Bivento nel quint'ultimo step di scavo (Figura 5.6). Di conseguenza, gli ultimi quattro step di calcolo hanno coinvolto cluster di terreno che insistono longitudinalmente lungo il fosso del Fico, e vengono quindi ritenuti erosi dalla sua stessa azione. Per questi ultimi step di scavo, incidenti in maniera più diretta sullo stato tenso-deformativo del versante oggetto di studio, il calcolo per ogni step di scavo è stato condotto integrando la consolidazione (filtrazione transitoria post-scavo) in condizioni idro-meccaniche totalmente accoppiate. Ognuna delle ultime quattro fasi di scavo ha avuto una durata di 250 anni, con una velocità del processo di erosione pari a 3cm/anno.

Per la configurazione 2 (Figura 5.5 e Figura 5.7) gli scavi hanno avuto pendenza pari a 6 gradi. In questo caso, la posizione attuale del fiume Bivento (Figura 5.7) è stata raggiunta prima degli ultimi sette step di scavo. Pertanto, in questo caso, la fase erosiva associata all'azione longitudinale del fosso Fico ha visto l'eliminazione di sette cluster di terreno, condotti secondo le metodiche del caso precedente. Ognuna di queste sette fasi ha avuto una durata di 140 anni, con una corrispondente velocità del processo di erosione pari a circa 5cm/anno.
Le condizioni idro-meccaniche implementate al contorno durante tutte le analisi sono quelle di seguito:

- il bordo inferiore del modello è sempre stato posto impermeabile e ne sono stati impediti gli spostamenti in tutte le direzioni per l'intera durata delle simulazioni.
- ai due bordi laterali è stata assegnata durante la fase di inizializzazione una condizione idrostatica a carico costante, con pelo libero coincidente con il piano campagna. In seguito, all'inizio di ogni step di calcolo le due condizioni al contorno idrauliche sono state aggiornate, mantenendo la condizione idrostatica a carico costante, con valore risultante del livello coincidente con il piano campagna.
- gli spostamenti, lungo entrambi i bordi, sono stati impediti in direzione x e lasciati liberi in direzione y.
- oltre a quanto detto è stata anche applicata la condizione di falda a piano campagna nelle evolutive posizioni occupate dal Bivento, aggiornandola ad ogni step di calcolo.

5.4 Risultati della modellazione

Nel seguito, le pressioni interstiziali calcolate verranno confrontate con i risultati dei monitoraggi piezometrici in corrispondenza delle verticali piezometriche C8p e C11p, entrambe dotate di una cella Casagrande (meno profonda) e di una cella elettrica (più profonda). I punti di snervamento, o punti plastici, assieme alle deformazioni deviatoriche plastiche accumulate invece, verranno confrontate con le deformazioni inclinometriche disponibili lungo la sezione (inclinometro C12i), e, da un punto di vista qualitativo, anche con le bande di taglio riconosciute come attive nel versante, sulla base delle analisi fenomenologiche.
I risultati verranno dapprima discussi in termini di pressioni interstiziali, che assieme allo stato di sforzo totale contribuiscono a determinare lo stato di sforzo efficace che controlla le condizioni di stabilità del pendio. È pertanto importante accertarsi innanzitutto che il regime delle pressioni interstiziali sia ben modellato, per poter considerare valide le deformazioni e gli snervamenti corrispondenti.
La Tabella 5.3 riporta i dati piezometrici in termini di pressioni interstiziali in kPa monitorati in corrispondenza delle celle piezometriche lungo il sondaggio C8p e lungo il C11p, collocate in sezione come mostrato in Figura 5.3, a confronto con i corrispondenti risultati al termine delle analisi numeriche effettuate con riferimento ad entrambe le configurazioni erosive modellizzate.
I dati in Tabella 5.3 mostrano che le previsioni delle pressioni interstiziali corrispondenti alla configurazione 1 sono più coerenti con i dati del monitoraggio piezometrico rispetto alle previsioni della configurazione 2. In particolare, per tutte le celle piezometriche le previsioni secondo la configurazione 1 sono vicine a quanto monitorato, con uno scarto massimo che è pari a circa l'8% in corrispondenza del piezometro elettrico C8p; è interessante altresì notare come per il piezometro Casagrande lungo la verticale C8p, che risulta al di sopra del pelo libero e quindi non registra pressioni interstiziali positive, la previsione numerica restituisce un valore di

suzione pari a circa 22 kPa, coerente con una collocazione sopra falda. Le previsioni piezometriche relative alla configurazione 2 sono più distanti da quanto monitorato in situ. Difatti, si riscontra una rilevante sottostima delle pressioni interstiziali, specialmente lungo la verticale piezometrica più a valle, C11p. Le ragioni di tali differenze sono da rintracciarsi nella inclinazione dei cluster di scavo per la configurazione 2 (Figura 5.5 e Figura 5.7). Infatti, secondo la configurazione 2 i cluster da eliminare durante la fase erosiva del fosso del Fico (ultimi cluster di scavo, ancora presenti in Figura 5.7), sovrastano in maniera più estesa il versante sede del processo franoso, differentemente da quanto accade con riferimento alla configurazione 1 (Figura 5.6). Dunque, durante la consolidazione accoppiata successiva a queste ultime fasi di scavo con la configurazione 2 si devono spegnere maggiori sovrapressioni interstiziali negative generate dallo scavo, rispetto a quelle generate dallo scavo secondo la configurazione 1.

Ne consegue che la modellazione secondo la configurazione 1 simula in maniera più accurata la storia del pendio, conducendo il modello ad una condizione idraulica, quindi di tensioni efficaci, attuale più vicina a quella monitorata. Quindi, nel seguito si discutono solo i risultati meccanici relativi alla modellazione secondo la configurazione 1.

Tabella 5.3. Confronto tra le pressioni interstiziali monitorate in situ, e quelle determinate dal modello in corrispondenza della posizione delle diverse celle.

Celle piezometriche	**u_w in situ [kPa]**	**u_w modello [kPa] Configurazione 1**	**u_w modello [kPa] Configurazione 2**
C8p_Casagrande (20m)	Piez. anidro	- 22,6	-19
C8p_Elettrico (40m)	160	173	160
C11p_Casagrande (25m)	180	176	-70
C11p_Elettrico (50m)	420	422	170

I risultati della modellazione da un punto di vista idraulico, per il modello secondo la configurazione 1, sono mostrati in termini di distribuzione delle linee equipotenziali in Figura 5.8. Queste mostrano che nella modellazione il flusso ha una rilevante componente verticale dell'alto verso il basso nella zona di monte del pendio, per poi tendere a diventare quasi parallelo al pendio nella zona centrale, fino a manifestare ancora una modifica di assetto che conferisce al flusso una componente verticale dal basso verso l'alto nella zona sede del corpo idrico recettore a fondovalle (letto del fiume Bivento).

Come c'era poi da attendersi, si è inoltre riscontrato all'interfaccia tra i materiali delle varie Unità che il flusso del acqua diventa fortemente condizionato dalle proprietà idrauliche dei diversi strati, configurando difatti flussi di maggiore intensità nei materiali più permemabili, e flussi di minore intensità nei materiali meno permeabili. A dimostrazione di questo, si riporta nella Figura 5.9 uno zoom della parte di monte del modello del pendio che mostra i vettori di filtrazione all'interno dei diversi materiali. Come è facile notare, il flusso ha un velocità (proporzionale alla grandezza dei vettori in Figura 5.9) che assume valore massimo per i vettori nella Unità 2a sabbiosa, leggermente poi più bassa nell'Unità 2b limosa, e ancora più piccola nell'Unità 3. La tendenza del flusso è a rimanere nel singolo strato seguendo il contrasto di permeabilità perssocchè orizzontale che ogni strato determina; difatti, l'acqua tende a rimanere nell'Unità 2b piuttosto che infiltrarsi all'interno dell'Unità 3, perlomeno fino a quando lo strato limoso incontra il piano campagna. In quella zona, chiaramente

si manifesta una fuoriuscita di acqua attraverso il piano campagna (coerentemente con la presenza di sorgenti di contatto come dettagliatamente documentato nel capitolo 8 della *Prima Rel. Di II Fase*); a valle poi del contatto tra l'unità limosa ed il piano campagna, l'acqua comunque si infiltra all'interno dello strato argilloso dell'Unità 3, ma con velocità estremamente basse, coerentemente alla permeabilità del materiale, e come visibile dalle ridotte dimensioni dei vettori del flusso in Figura 5.9.

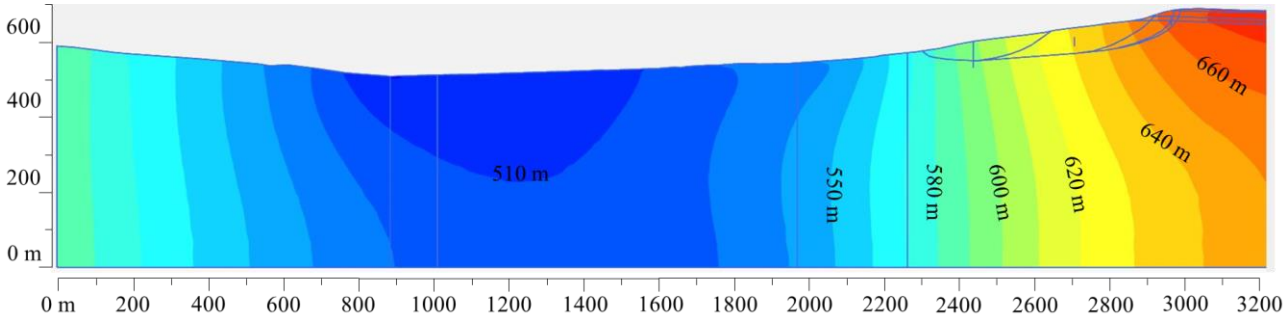


Figura 5.8. Equipotenziali della filtrazione stazionaria al termine dell'intera fase di erosione, con riferimento alla Configurazione 1.

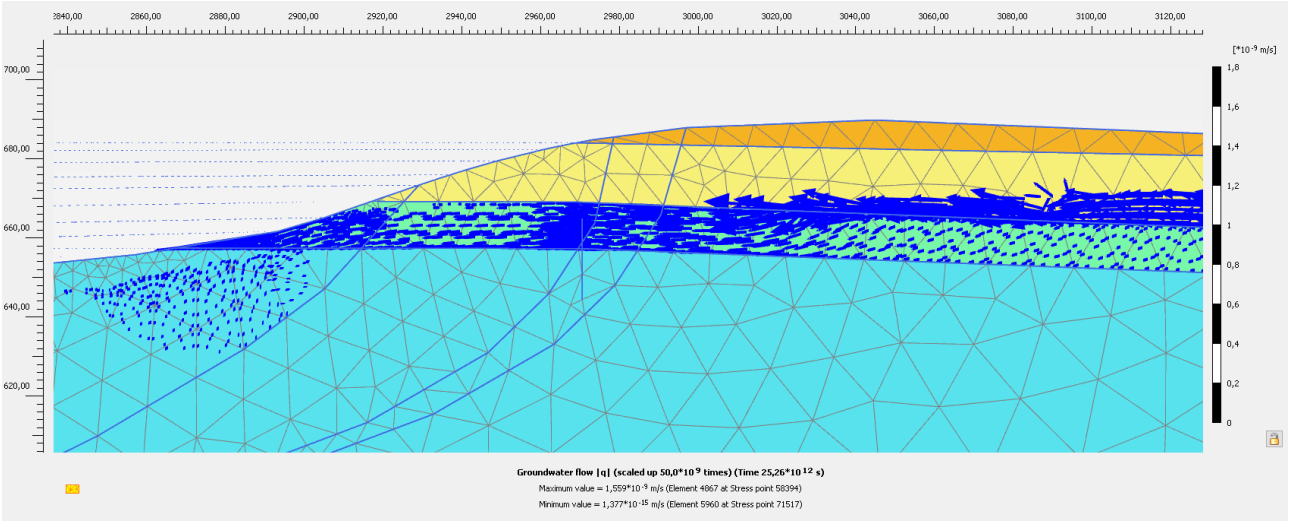


Figura 5.9. Vettori di flusso dell'acqua nelle diverse unità litostratigrafiche nell'ultima fase di calcolo.

Per quanto il pendio a fine scavo, dopo 1000 anni di filtrazione transitoria, risulti ancora stabile, gli stati di snervamento (o plasticizzazione) al termine dell'intera fase di erosione modellizzata secondo la configurazione 1, mostrati in Figura 5.10 (punti rossi), forniscono indicazione delle zone ove si concentra la plasticizzazione e la rottura nel pendio, dunque la morfologia delle zone dove sono partite bande di taglio, indicandone anche la tendenza evolutiva.

In particolare, si fa notare che la Figura 5.10 riporta anche uno zoom della zona di piede del versante, ove appare concentrarsi la localizzazione dello snervamento. Nella figura, le linee blu rappresentano le bande di

taglio ricostruite tramite monitoraggi e ricognizioni in situ, per i corpi P2, P1 e P1*.

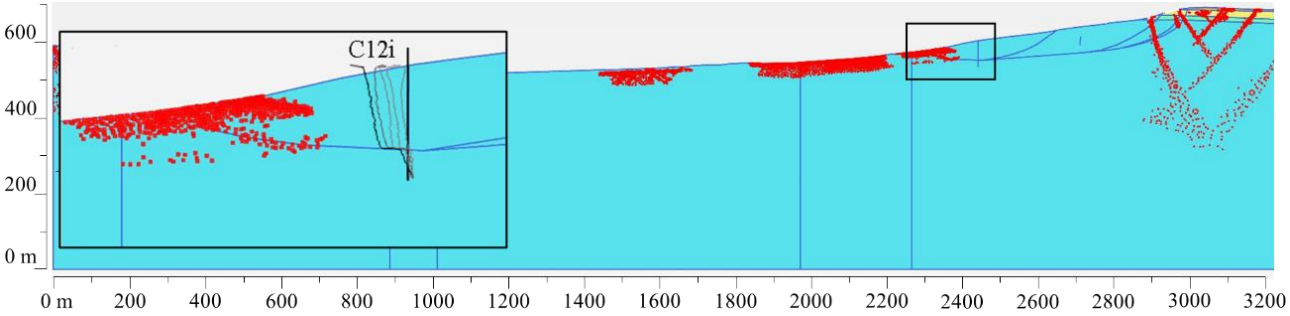


Figura 5.10. Punti plastici risultanti alla fine dell'analisi dell'intero processo erosivo con riferimento alla Configurazione 1.

È interessante osservare come la plasticizzazione, oltre che investire uno strato spesso circa 15 m in corrispondenza nella zona di emersione al piede della banda di taglio ricostruita su base fenomenologica (piede dei tre corpi citati, P2, P1 e P1*), retrogredisce verso monte con punti plastici che bene si allineano lungo la banda di taglio più profonda, intercettata a 50 m dall'inclinometro C12i. Tale approfondimento della plasticizzazione predispone la mobilizzazione di corpi di frana molto profondi. Da tale confronto si evince che le previsioni numeriche sono in pieno accordo con quanto ricostruito su base fenomenologica nel capitolo 1.

La modellazione numerica secondo la configurazione 1, quindi, appare pienamente efficace ne confermare che il meccanismo di rottura e retrogressione innescato dallo scavo vallivo ha comportato una banda di taglio tendente all'approfondimento, il che corrobora lo stile del meccanismo franoso, di tipo roto-traslativo multiplo, lento e molto profondo.

Ulteriore risultato significativo, sono le localizzazioni dei punti plastici risultati dall'analisi nella porzione di monte del meccanismo franoso, al di sotto del centro abitato di Chieuti. Difatti, il pattern di punti plastici in Figura 5.10, mostra come assolutamente plausibili processi di plasticizzazione alla testa del pendio con generazione di bande di taglio confinanti copri in scarpata profondi, coerenti con le dinamiche di spostamento registrate nella zona nord- occidentale del centro storico, discusse approfonditamente nel capitolo 1. Questi meccanismi a monte sono chiaramente il risultato di un rilevante scarico laterale nella zona di cresta del versante, che comporta processi di rottura attiva, che poi, per congruenza, evolvono in cunei che tendono a manifestare importanti spostamenti verticali, nello stile dello schema di frana in Figura 1.65b (capitolo 1).

Corrispondentemente ai pattern di snervamento descritti con riferimento alla configurazione 1 e riportati in Figura 5.10, si riportano in Figura 5.11 i contour delle deformazioni deviatoriche accumulate nel pendio alla fine dell'intero processo di erosione. Con particolare riferimento alla zona di piede, le deformazioni deviatoriche mostrano varie zone di localizzazione, come quelle riportate nella porzione ingrandita nel riquadro di sinistra della Figura 5.11. Ognuna di queste zone di localizzazione è conseguente all'erosione di un cluster, ma deformazioni deviatoriche dell'ordine del 2-4% vengono previste solo dopo lo scavo dell'ultimo cluster, in corrispondenza della zona di emersione delle bande di taglio rilevate in sito (Figura 5.10). Inoltre, anche nella zona di monte, rilevanti localizzazioni della deformazione vengono identificate (dell'ordine del 6-8% circa) coerentemente con i punti plastici attivi e riportati in Figura 5.8. Come già chiarito, la chiara forma

a "cuneo" del blocco confinato da tali bande alla testa risulta coerente con il cinematismo rilevato geomaticamente, caratterizzato nel capitolo 1.

È però importante ricordare che la legge costitutiva adottata non permette di simulare la variazione della rigidezza del materiale con lo stato di confinamento, quindi con la profondità, per cui i valori di deformazione deviatorica accumulata nella zona di monte in profondità, sono potenzialmente sovrastimati. Pertanto, i contours di deformazione riportati in Figura 5.11 nella parte alta del pendio devono essere considerati solo rappresentativi da un punto di vista qualitativo del meccanismo ivi destatosi.

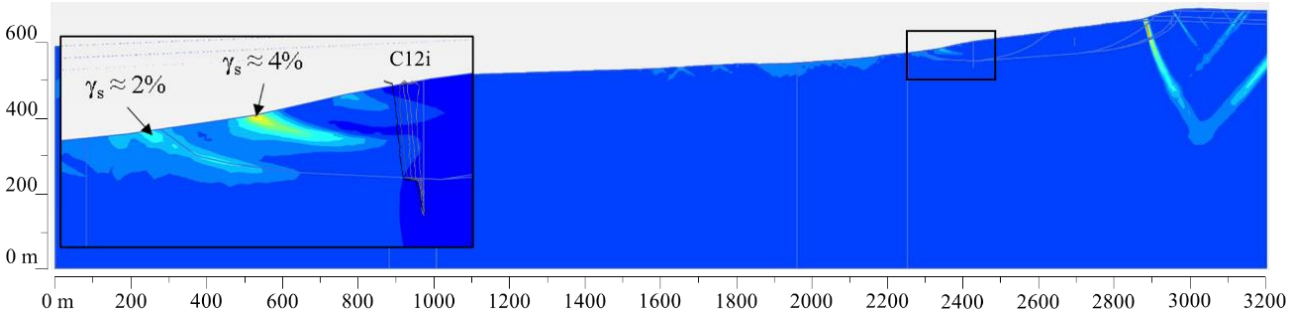


Figura 5.11. Deformazioni deviatoriche plastiche risultanti alla fine dell'analisi dell'intero processo erosivo con riferimento alla Configurazione 1.

In conclusione, si ritiene che la modellazione numerica corrobori l'interpretazione del meccanismo franoso desunta in base ai rilievi geomorfologici, alle analisi geostrutturali e stratigrafiche, al monitoraggio inclinometrico e degli spostamenti a piano campagna, ed alle analisi LEM, e riportata nei capitoli precedenti. Difatti, si rimarca come la modellazione numerica, sia in termini di localizzazione della plasticizzazione (punti plastici in Figura 5.10) che di localizzazione delle deformazioni deviatoriche (Figura 5.11), consente di caratterizzare il meccanismo di frana come profondo e retrogressivo, con piede in corrispondenza del fosso tributario del vallone del Fico, ed approfondimento coerente con il piegamento inclinometrico rilevato lungo il C12i. Si ritiene che un'analisi numerica condotta implementando, al termine dello scavo vallivo, il profilo pre-frana del versante occidentale di Chieuti, ossia un profilo di pendio più acclive di quello adottato, comporti una previsione di ulteriore retrogressione profonda della banda di taglio nel pendio, rendendo ancora più evidente la conferma dell'interpretazione fenomenologica. Non si è condotta una tale analisi non avendo elementi per una fedele ricostruzione del profilo del pendio pre-frana.

6 ANALISI DEGLI EFFETTI DELL'INTERAZIONE PENDIO-VEGETAZIONE-ATMOSFERA

Il presente Capitolo riguarda lo studio degli effetti di interazione del pendio con la vegetazione presente al suolo e con l'atmosfera, in termini di scambi di flusso d'acqua, in forma liquida e di vapore, che avvengono tra il terreno e l'atmosfera per effetto delle precipitazioni e del processo di evapo-traspirazione. Attraverso una modellazione idraulica agli elementi finiti di tipo transitorio, è possibile valutare gli effetti che tali flussi variabili nel tempo producono sul regime di filtrazione nel pendio e, conseguentemente, prevedere l'incidenza degli stessi sulla evoluzione delle condizioni di stabilità del versante nel tempo.

La modellazione numerica bidimensionale dei processi di filtrazione transitoria nel pendio è stata condotta mediante analisi idrauliche, facendo uso del codice agli elementi finiti Seep/W (Geo-Slope International, 2004), usato anche per la modellazione della filtrazione stazionaria presentata nel Capitolo 4. La sezione di riferimento è, come per le analisi di filtrazione stazionaria, la sezione CC (Figura 4.5).

Nel seguito verrà innanzitutto illustrata la strategia di modellazione adottata, in termini di definizione del modello di calcolo e di approccio per la stima del flusso evapo-traspirativo. Saranno dunque mostrate le condizioni al contorno applicate, con particolare attenzione al bordo in interazione con il clima e con la vegetazione. Infine, saranno discussi i risultati della modellazione numerica a confronto con i dati di monitoraggio di sito.

6.1 Modello di pendio

La modellazione numerica della filtrazione transitoria è stata eseguita con riferimento alla sezione CC, già di riferimento per le analisi di filtrazione stazionaria presentate al Capitolo 4.

La caratterizzazione idraulica dei terreni è quella descritta nel Capitolo 4; in particolare, i valori di permeabilità satura assunti per le diverse unità scaturiscono dal complesso di analisi parametriche menzionate nel Capitolo 4 e sono: k_{sat}=5·E-9 m/s per l'Unità 1 dislocata, k_{sat}=5·E-11 m/s per l'Unità 1, k_{sat}=E-8 m/s per la sub-Unità 2a, k_{sat}=5·E-9 m/s per la sub-Unità 2b e k_{sat}=E-10 m/s per l'Unità 3. Ai terreni parzialmente saturi al di sopra del pelo libero sono state assegnate le curve di ritenzione e di conducibilità idraulica illustrate in Figura 4.7.

I parametri idraulici adottati nelle analisi di filtrazione transitoria sono sintetizzati in Tabella 4.4.

Per le analisi di filtrazione transitoria, tuttavia, è stato necessario modificare la discretizzazione del dominio per renderla compatibile con l'applicazione, al bordo superiore, di una condizione al contorno rappresentativa degli scambi di flusso attivati dall'interazione del pendio con la vegetazione e con l'atmosfera.

Il dominio di calcolo è stato pertanto discretizzato con elementi quadrangolari a quattro nodi di altezza crescente con la profondità, al fine di ottenere una mesh più fine negli strati di terreno più superficiali direttamente interessati dall'interazione con l'atmosfera. In particolare, come mostrato nell'ingrandimento di Figura 6.1, gli elementi della mesh hanno altezza di 5 cm nei primi 15 cm di profondità, altezza crescente da 20 cm a 60 cm entro i successivi 10 m di profondità e altezza superiore ai 60 cm al per profondità superiori a 10 m dal piano campagna.

Le condizioni al contorno idrauliche al bordo inferiore e ai bordi laterali sono state assegnate in analogia alle analisi di filtrazione stazionaria come illustrato in Figura 5.12: alla base del modello è stato assegnato un bordo impermeabile; sul bordo verticale di valle è stata assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni con pelo libero a 5 m dal p.c.; sul bordo verticale di monte è stato applicato il profilo "scalettato 3", con valori del carico idraulico crescenti a gradini da 205 m a 220 m s.l.m., al fine di simulare il regime di flusso tridimensionale nel promontorio secondo quanto discusso nel Capitolo 4. A piano campagna, ossia in corrispondenza della superficie libera del versante, è stata impostata la condizione di pressione interstiziale nulla in corrispondenza dell'intercezione del torrente del Fico, mentre per la porzione rimanente è stata definita una condizione al contorno variabile nel tempo, descrittiva dell'interazione con la vegetazione e con l'atmosfera.

Nel dettaglio, tale interazione è in genere schematicamente modellata attraverso un flusso idraulico giornaliero entrante, coincidente con la precipitazione giornaliera totale, ed un flusso idraulico giornaliero uscente, coincidente con il flusso di evapo-traspirazione. Un approccio diffuso prevede l'applicazione a piano campagna di un flusso giornaliero coincidente con la pioggia netta, intesa come pioggia totale ridotta del flusso di evapo-traspirazione. Nella modellazione numerica qui discussa, è stato invece utilizzato un approccio più avanzato, consistente nell'applicazione separata dei due flussi: la precipitazione giornaliera è stata applicata come condizione di bordo al piano campagna, mentre l'evapo-traspirazione giornaliera è stata assegnata ad un apposito *layer* alla profondità di 15÷20 cm al di sotto del piano campagna. Attraverso questo artificio numerico, conosciuto in letteratura (vedasi ad esempio Guglielmi, 2014; Balzano et al., 2019), è possibile superare i limiti dell'applicazione della pioggia netta giornaliera a piano campagna; in particolare, separando il flusso evapo-traspirativo dalla precipitazione, tale approccio permette di tener conto dell'incidenza solo sul primo della effettiva disponibilità d'acqua nel terreno, aggiornando con il calcolo il tasso di evapo-traspirazione reale senza bisogno di calcolarlo *a-priori*.

Inoltre, questo approccio è capace di simulare l'estrazione d'acqua per traspirazione attivata dall'apparato radicale nel terreno immediatamente al di sotto del piano campagna (es. Nyambayo & Potts, 2010).

Per inizializzare il regime di filtrazione nel pendio, è stata effettuata per il nuovo dominio di calcolo una analisi di filtrazione stazionaria applicando al piano campagna la condizione di drenaggio libero e ai bordi laterali ed inferiore le condizioni al contorno mostrate in Figura 6.1. A partire da questa condizione iniziale, sono state eseguite analisi transitorie per 6 anni idrologici consecutivi, corrispondenti al periodo dal 01/09/2015 al 31/08/2021. Per garantire la stabilizzazione del risultato numerico, sono stati effettuati due cicli di analisi, ciascuno corrispondente al periodo menzionato; nel successivo paragrafo 6.3, saranno presentati solo i risultati relativi al secondo ciclo di analisi.

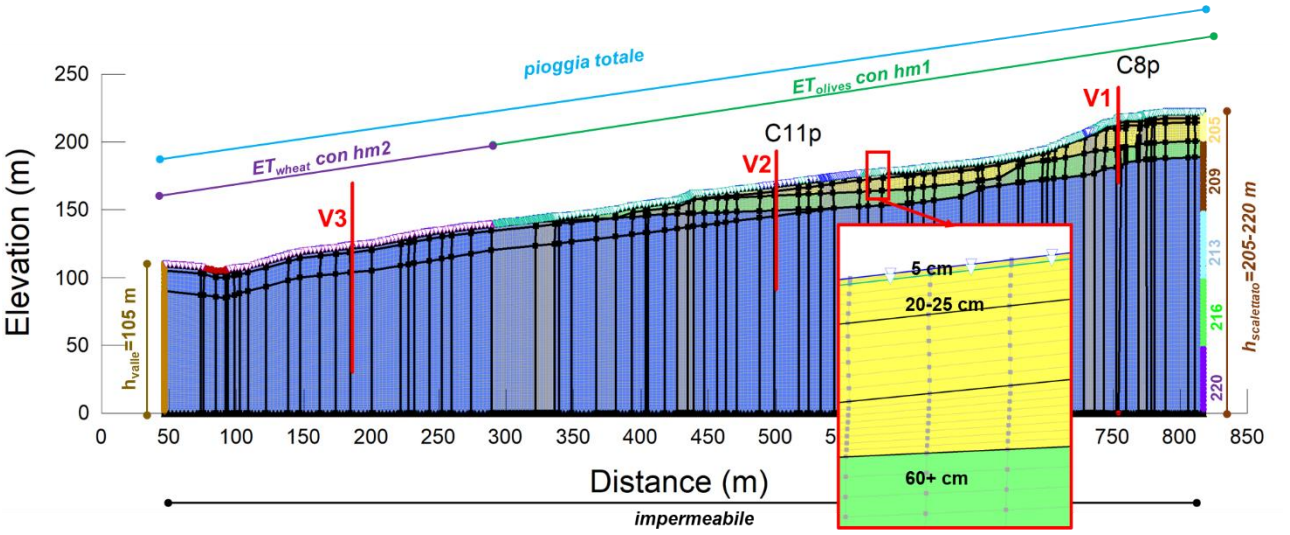


Figura 5.12 Mesh di calcolo e condizioni idrauliche al contorno nel modello numerico FEM per le analisi di filtrazione transitoria lungo la sezione CC.

6.2 Caratterizzazione del bordo in interazione con l'atmosfera

Per caratterizzare rigorosamente la condizione idraulica transitoria rappresentativa dell'interazione con l'atmosfera, occorre disporre dei dati di monitoraggio nel tempo delle variabili climatiche (precipitazione, temperatura, umidità relativa, velocità del vento, radiazione solare), registrate presso una stazione meteorologica installata presso il sito in esame.

Nel caso del versante occidentale di Chieuti, non potendo disporre di registrazioni di lungo corso presso alcuna stazione meteorologica in sito, è stato necessario individuare una stazione meteorologica di riferimento per i dati climatici tra quelle situate nelle vicinanze, attraverso la consultazione di archivi e siti web provvisti di database accessibili pubblicamente. Infine, si è ritenuto opportuno assumere come riferimento la stazione di Serracapriola che, pur trovandosi in territorio pugliese, afferisce alla Protezione Civile della Regione Molise; tale stazione è ubicata a latitudine N 41°48'25'' e longitudine E 15°9'50'', con altitudine di 249 m s.l.m., e si trova a soli circa 5 km a Sud rispetto al comune di Chieuti.

I dati di precipitazione giornaliera registrati alla stazione di Serracapriola per il periodo di riferimento (Figura 6.2a) hanno fornito la condizione idraulica di bordo applicata al piano campagna; i dati di temperatura minima e massima giornaliera per il periodo di riferimento (Figura 6.2b), insieme alle registrazioni di precipitazione, sono stati utilizzati per il calcolo dell'evapo-traspirazione.

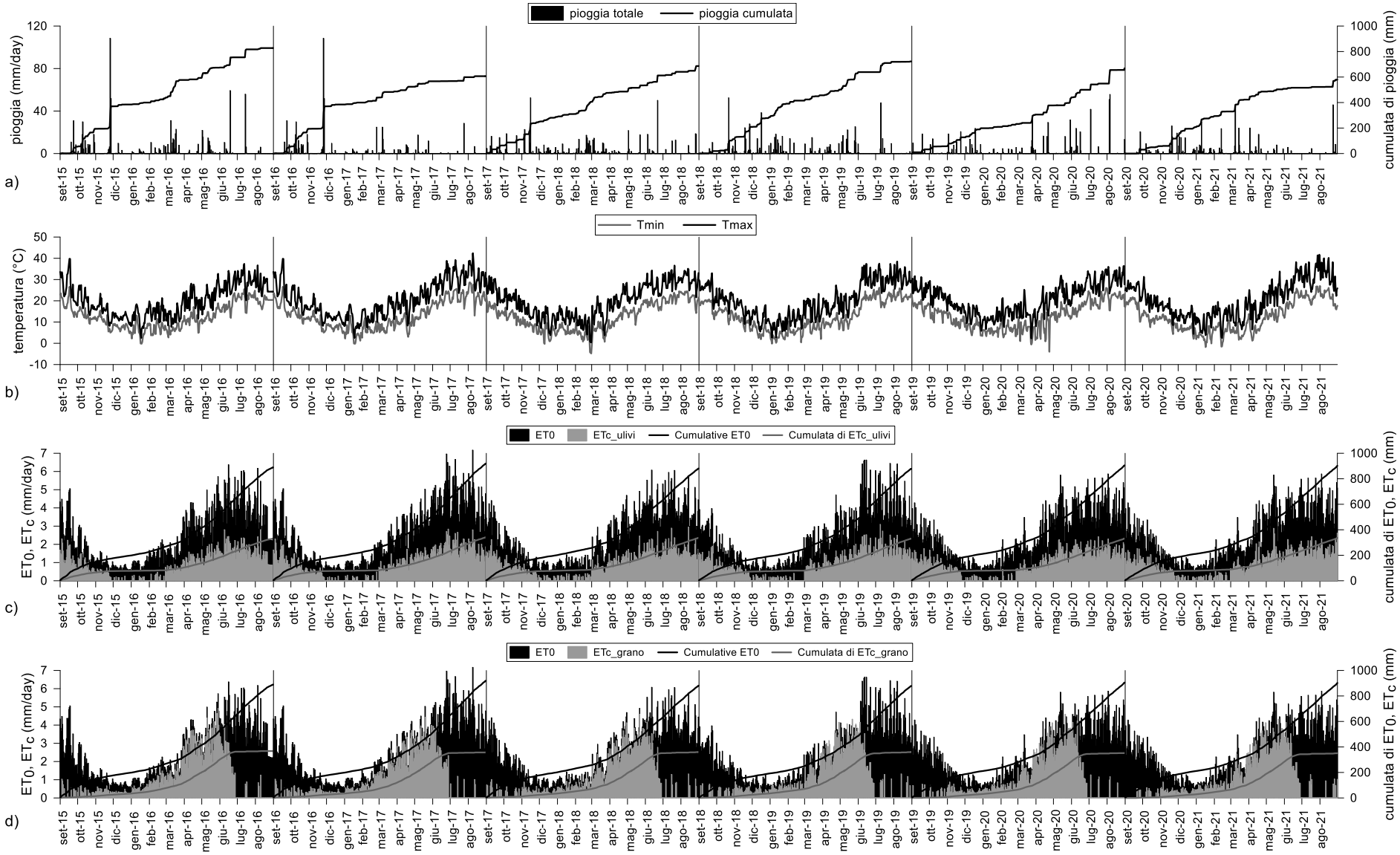


Figura 5.13 Caratterizzazione della condizione al bordo superiore: a) precipitazioni giornaliere e cumulate; b) temperature minima e massima giornaliere; ET0 e ETc giornaliere e cumulate per c) coltivazione di ulivo e d) coltivazione di grano.

Per la stima del flusso evapo-traspirativo è stato adottato il metodo FAO-Penman-Monteith (Allen et al., 1998), secondo l'approccio a doppio coefficiente. Nello specifico, gli algoritmi riportati in Allen et al. (1998) sono stati implementati in un apposito foglio di calcolo per la stima dell'evapo-traspirazione. Di seguito si descrive brevemente il metodo FAO-Penman-Monteith, rimandando ad Allen et al. (1998) e Cotecchia et al. (2019) per ulteriori approfondimenti.

Il metodo consente di stimare l'evapotraspirazione giornaliera di riferimento, ET_0, che rappresenta un'evapotraspirazione potenziale relativa a una coltivazione standard avente altezza, resistenza superficiale e albedo (definita come il potere riflettente di una superficie) di valori noti. In mancanza di un set completo di dati climatici (precipitazione, temperatura, umidità relativa, velocità del vento, radiazione solare), come in questo caso, il metodo consente di stimare l'evapotraspirazione di riferimento ET_0 a partire da precipitazione, temperature minima e massima giornaliera e coordinate geografiche (latitudine, longitudine, altitudine) del sito in esame.

L'approccio a doppio coefficiente colturale permette, attraverso l'introduzione del coefficiente di evaporazione, k_e, e del coefficiente colturale basale, k_{cb}, di stimare l'evapotraspirazione potenziale, ET_c, come somma del flusso evaporativo potenziale, ET_0k_e, e del flusso traspirativo potenziale, ET_0k_{cb}. In particolare, il coefficiente k_{cb} è univocamente associato alla specie di vegetazione al suolo ed al suo ciclo vegetativo nel corso dell'anno, che si articola in 4 fasi di sviluppo (*initial, crop development, mid season, late season*). Per una varietà di specie vegetali, Allen et al. (1998) forniscono le durate in giorni, L, ed i valori del coefficiente k_{cb} di ciascuna fase del ciclo vegetativo.

Con riferimento al versante occidentale di Chieuti, la vegetazione sul pendio è prevalentemente costituita da ulivi, con copertura di circa il 60%, nella zona di monte, fino all'affioramento della sub-Unità 2b; la restante parte del versante in zona di valle è coltivata a grano, con percentuale di copertura stimata di 80%. In Tabella 6.1 sono riportati i valori di k_{cb} e le durate delle fasi del ciclo vegetativo per ulivo e grano, desunte da Allen et al. (1998). Durante il periodo di sviluppo (*development*), il coefficiente k_{cb} varia linearmente tra il valore iniziale ed il valore della stagione intermedia; analogamente, nel periodo finale (*late*), la riduzione del coefficiente rispetto alla stagione intermedia è lineare fino al valore $k_{cb,late}$.

Tabella 5.4 Caratterizzazione della vegetazione presente sul versante.

specie vegetale		***initial***	***development***	***mid-season***	***Late***
ulivo	**k_{cb}**	0,55	aumenta linearmente	0,65	diminuisce linearmente fino a 0,65
	L (giorni)	30 (da 01/03)	90	60	90
grano	**k_{cb}**	0,4	aumenta linearmente	1,1	diminuisce linearmente fino a 0,3
	L (giorni)	30 (da 01/11)	140	40	30

Per la definizione del coefficiente k_e occorre tener conto che l'evaporazione avviene prevalentemente dalle porzioni di terreno non vegetate e che essa è massima a seguito di un evento di pioggia; pertanto, in accordo con la procedura di calcolo semplificativa proposta da Allen et al. (1998), l'algoritmo per stimare il coefficiente k_e restituisce valore massimo in corrispondenza dei giorni di pioggia.

A titolo esemplificativo, in Figura 6.3 sono riportati gli andamenti dei coefficienti k_{cb} e k_e per l'anno idrologico 01/09/2020-31/08/2021 per la coltivazione di ulivo (a) e di grano (b).

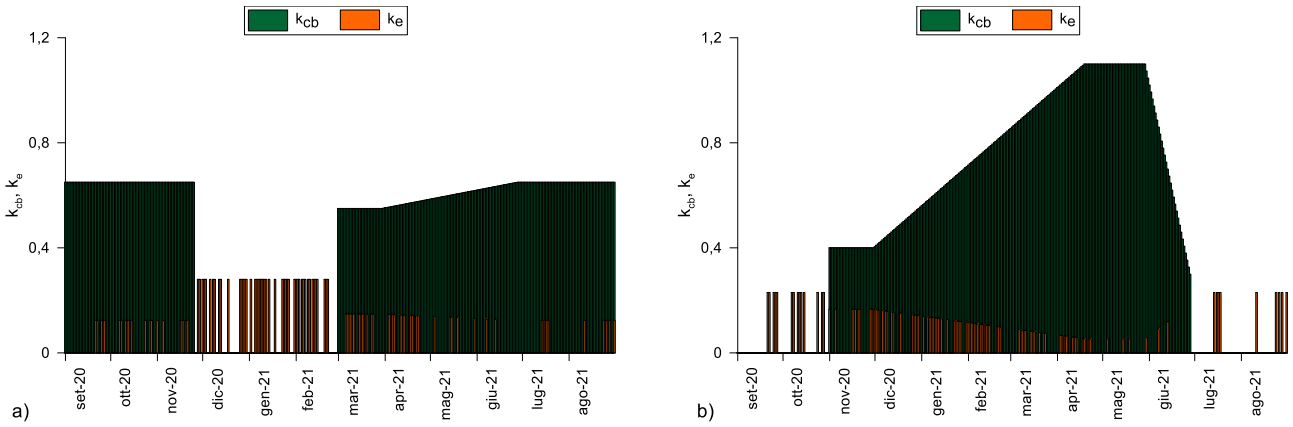


Figura 5.14 Coefficienti kcb e ke per a) coltivazione di ulivo e b) coltivazione di grano.

Il flusso evapo-traspirativo stimato è potenziale, poiché ottenuto senza tener conto della effettiva disponibilità d'acqua nel terreno. Il codice di calcolo adottato permette di tener conto di tale dipendenza, convertendo il valore potenziale di ET_c in valore reale, attraverso l'introduzione di una funzione, detta *hydraulic modifier (hm* nel seguito), che tiene conto della riduzione dell'acqua disponibile nel terreno per l'estrazione, a mano a mano che la suzione aumenta. Tale funzione introduce un fattore di riduzione, che assume valore 1 (totale disponibilità d'acqua) fino a un valore di suzione s_1 e si riduce linearmente fino a 0 al raggiungimento della suzione s_2. La letteratura suggerisce che s_1 generalmente varia tra 70 e 400 kPa, mentre s_2 varia tra 1000 e 2000 kPa, in funzione del tipo di terreno.

Al fine di tener conto delle differenti caratteristiche composizionali e ritentive dei materiali affioranti sul versante in esame, è stato necessario perciò definire due funzioni di riduzione *hm*: la funzione *hm1*, che presenta s_1=100 kPa e s_2=300 kPa, valida per i materiali più grossolani, meno ritentivi, che affiorano in zona di monte (Unità 1 e 1 dislocata, sub-Unità 2a e 2b); la funzione *hm2*, che presenta s_1=300 kPa e s_2=1500 kPa, relativa alle argille dell'Unità 3. Le due funzioni sono illustrate in Figura 6.4.

Le funzioni *hm1* e *hm2* sono state applicate in concomitanza con i flussi di evapo-traspirazione giornaliera: a partire da monte fino all'affioramento della sub-unità 2b sul versante, la condizione idraulica applicata al di sotto del p.c. è stata ottenuta combinando ET_c stimata per gli ulivi con *hm1*; più a valle, invece, sul layer al di sotto del p.c. è stata applicata ET_c stimata per il grano, combinata con *hm2* (Figura 6.1).

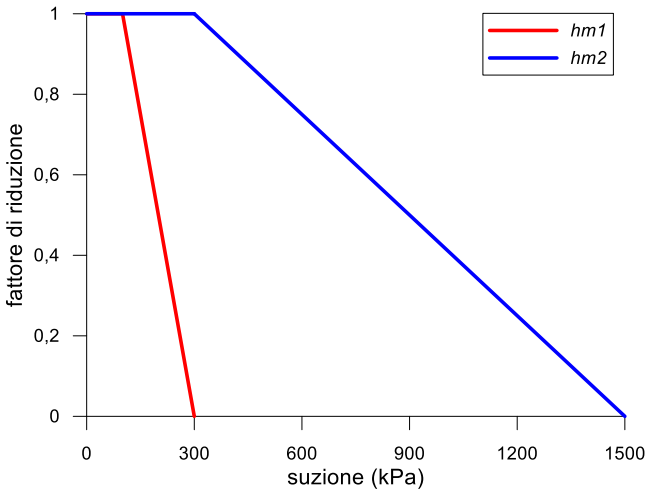


Figura 5.15 Funzioni di riduzione dell'evapo-traspirazione all'aumentare della suzione.

6.3 Confronto tra previsioni e dati di monitoraggio

I risultati delle analisi di filtrazione transitoria sono illustrati nel seguito con riferimento al secondo ciclo di calcolo per il periodo di riferimento (01/09/2015 – 31/08/2021). Tali risultati sono esaminati lungo 3 verticali, mostrate in Figura 6.1. Le due verticali di monte e di metà pendio, corrispondenti a C8p e C11p, permettono di confrontare le pressioni interstiziali (o *pore water pressures*, PWP) ottenute attraverso la modellazione numerica con quelle misurate dai piezometri. La terza verticale, V3, è ubicata più a valle, nella zona di affioramento dell'Unità 3 (Figura 6.1); lungo tale verticale non si dispone di misure piezometriche, ma è comunque possibile esaminare la variazione nel tempo dei profili di PWP di previsione numerica con la profondità.

La Figura 6.5a mostra con linea continua l'andamento dei valori di PWP ottenuti come risultato della modellazione numerica per il periodo in esame lungo la verticale C8p, alle profondità di installazione della cella piezometrica Casagrande (C8p-CC a 19 m, all'interno della sub-Unità 2a) e della cella elettrica (C8p-CE a 38 m, all'interno dell'Unità 3), a confronto con le misure rilevate dalle stesse celle (simboli).

Si rileva che per la cella a 19 m la PWP prevista con il calcolo è pari a circa 13 kPa, mentre nell'unica misura piezometrica effettuata in data 22/02/2021 il piezometro era risultato anidro, in quanto installato in terreno parzialmente saturo. Per la cella a 38 m, invece, lo scostamento tra la PWP misurata e quella calcolata è di circa 60 kPa, confrontabile con quello ottenuto nelle analisi di filtrazione stazionaria, a parità di condizione idraulica di monte (capitolo 4, Tabella 4.2.4).

In Figura 6.5b sono illustrati gli andamenti della PWP calcolata avendo ristretto il range di pressioni interstiziali, in modo da permettere di esaminare le fluttuazioni nel tempo in risposta alla forzante climatica applicata al bordo superiore. Nel periodo di riferimento, la PWP presenta un andamento quasi monotono, con oscillazioni trascurabili, ed un aumento complessivo di 0,2 kPa a 19 m e di circa 2 kPa a 38 m di profondità; tali piccole variazioni sono compatibili con le ridotte escursioni osservate per la cella C8p-CC (<2 kPa).

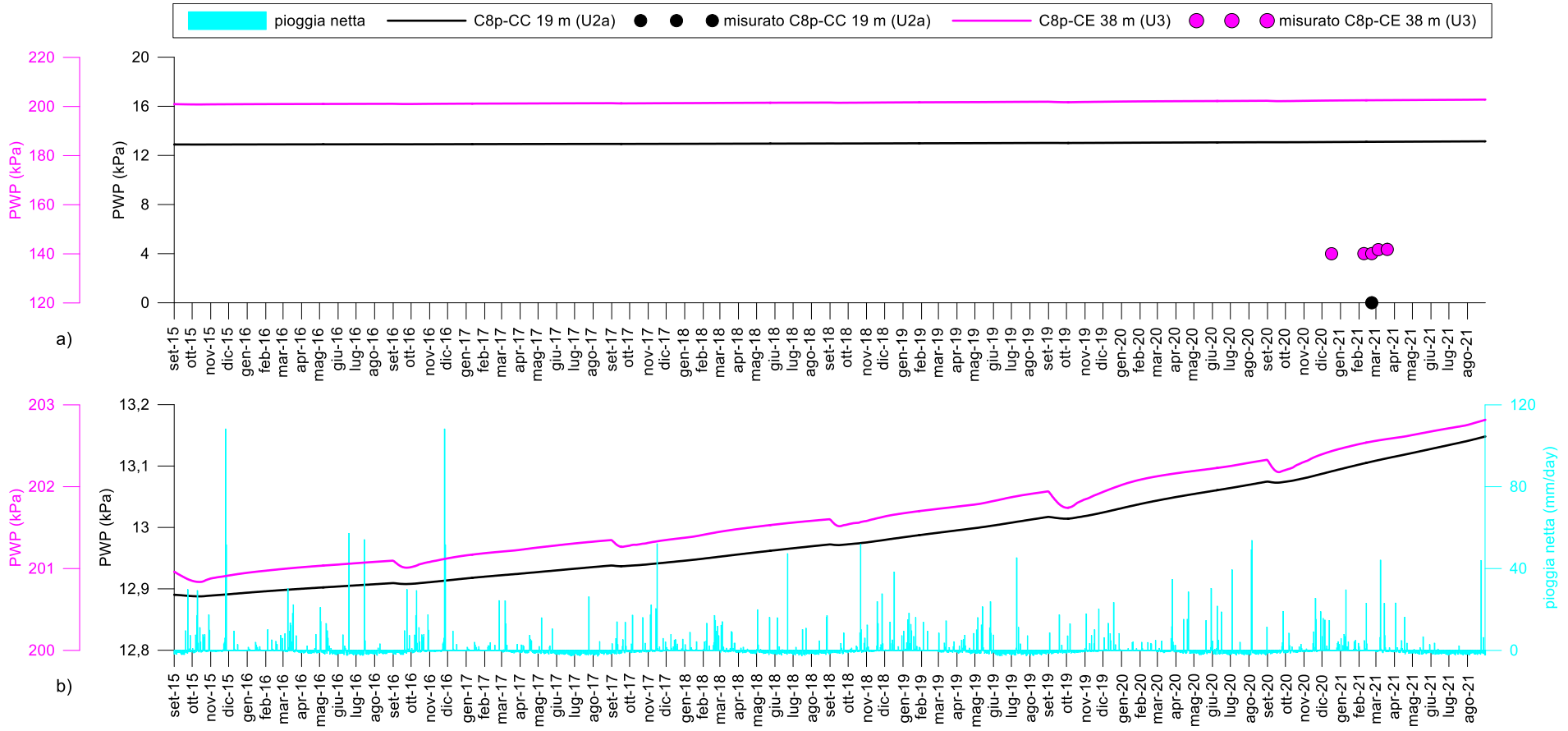


Figura 5.16 Verticale C8p: a) confronto tra i risultati delle analisi di filtrazione transitoria e i dati di monitoraggio piezometrico; b) ingrandimento.

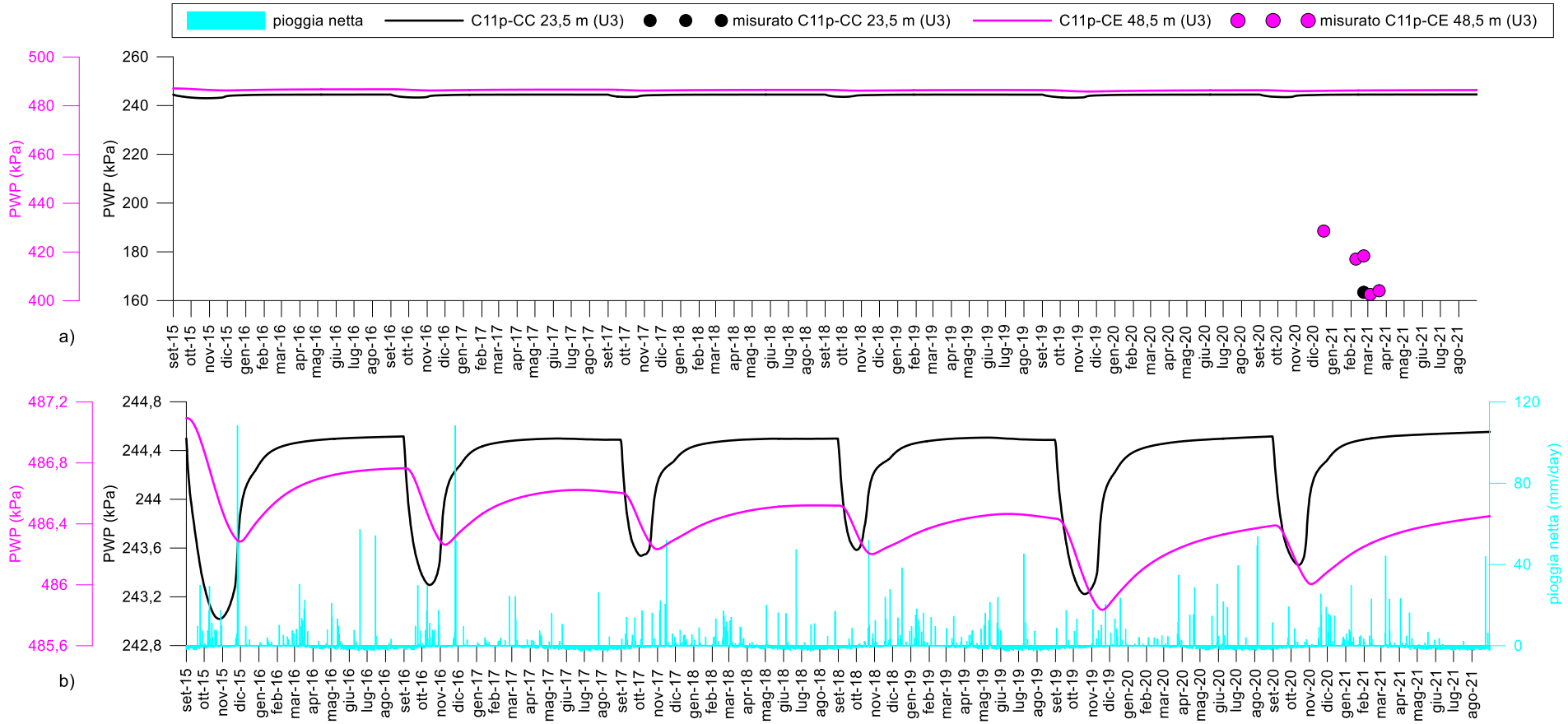


Figura 5.17 Verticale C11p: a) confronto tra i risultati delle analisi di filtrazione transitoria e i dati di monitoraggio piezometrico; b) ingrandimento.

Analogamente, in Figura 6.6 sono illustrati i risultati numerici a confronto con le misure piezometriche lungo la verticale di metà pendio C11p, alle profondità di 23,5 m (C11p-CC) e 48,5 m nell'Unità 3 (C11p-CE).
Il confronto tra le misure piezometriche e le previsioni numeriche (Figura 6.6a) rivela uno scostamento di circa 80 kPa per la cella C11p-CC e compreso nell'intervallo 50÷85 kPa per la cella C11p-CE. In questo caso, si dispone di una sola misura per C11p-CC, mentre più misure sono state registrate in C11p-CE: queste osservazioni mostrano una riduzione di PWP di circa 25 kPa tra dicembre 2020 e marzo 2021, da attribuirsi al riequilibrio idraulico post-installazione del piezometro, piuttosto che all'interazione del pendio col clima.
La Figura 6.6b mette in evidenza le fluttuazioni previste dal modello per le due celle, che appaiono estremamente contenute e comunque inferiori a 1,5 kPa. Tali fluttuazioni, pur essendo estremamente limitate, sembrano presentare un trend stagionale, diversamente da quelle mostrate per C8p: i valori di PWP sembrano infatti diminuire da settembre a fine ottobre per poi aumentare rapidamente fino a marzo e rimanere stabili sul massimo valore raggiunto; questo viene mantenuto fino all'incirca all'inizio di settembre.
I risultati di Figura 6.5 e 6.6 mostrano che le fluttuazioni delle pressioni interstiziali calcolate a diverse profondità, sia a monte sia a metà pendio, sono estremamente modeste; ciò appare in accordo con le misure piezometriche disponibili che suggeriscono piccole variazioni delle pressioni interstiziali nel tempo. Tale considerazione rivelano che l' impatto che i processi di filtrazione transitoria innescati nel versante dall'interazione terreno-vegetazione-atmosfera sui carichi piezometrici è trascurabile e confermano che le PWP rimangono pressoché costanti durante l'anno e non subiscono l'effetto della condizione transitoria applicata al bordo superiore.
A supporto di quanto suggerito dai risultati fin qui illustrati, si riportano nelle Figure 6.7, 6.8 e 6.9 i profili numerici di PWP con la profondità lungo le 3 verticali in esame in corrispondenza di diverse stagioni dell'anno; a titolo esemplificativo si è scelto di fare riferimento all'anno idrologico 2020-2021, perciò i profili mostrati si riferiscono ai giorni 21 settembre 2020, 21 dicembre 2020, 21 marzo 2021, 21 giugno 2021. Per ciascuna verticale è schematicamente indicata la successione stratigrafica attraversata.
Lungo la verticale C8p (Figura 6.7), i profili a fine stagione rivelano una profondità del pelo libero di circa 20 m da piano campagna; tali profili si presentano perfettamente sovrapposti per profondità superiori a 40 cm. Nello strato superficiale, l'andamento delle suzioni calcolato nei primi 15÷20 cm è condizionato dell'applicazione del flusso evapo-traspirativo al bordo interno, dunque è fittizio. In corrispondenza di tale bordo di applicazione di ET_c, le previsioni numeriche restituiscono suzioni piuttosto elevate che, tuttavia, non superano i 300 kPa per effetto della funzione di riduzione *hm1* applicata nella zona di monte. Si osserva inoltre che il profilo del 21 dicembre appare più avanzato di 30 kPa rispetto agli altri 3 profili, che risultano invece sovrapposti.
In Figura 6.8 sono mostrati i profili di PWP lungo la verticale C11p; in questo caso la posizione del pelo libero è poco profonda, entro meno di 5m dal piano campagna. I profili di fine stagione nei giorni 21 dicembre, 21 marzo e 21 giugno coincidono a tutte le profondità, mentre il profilo nel giorno 21 settembre si presenta spostato verso valori più bassi di PWP di circa 2 kPa a tutte le profondità, compatibilmente con quando mostrano gli andamenti di PWP nel tempo di Figura 6.6.

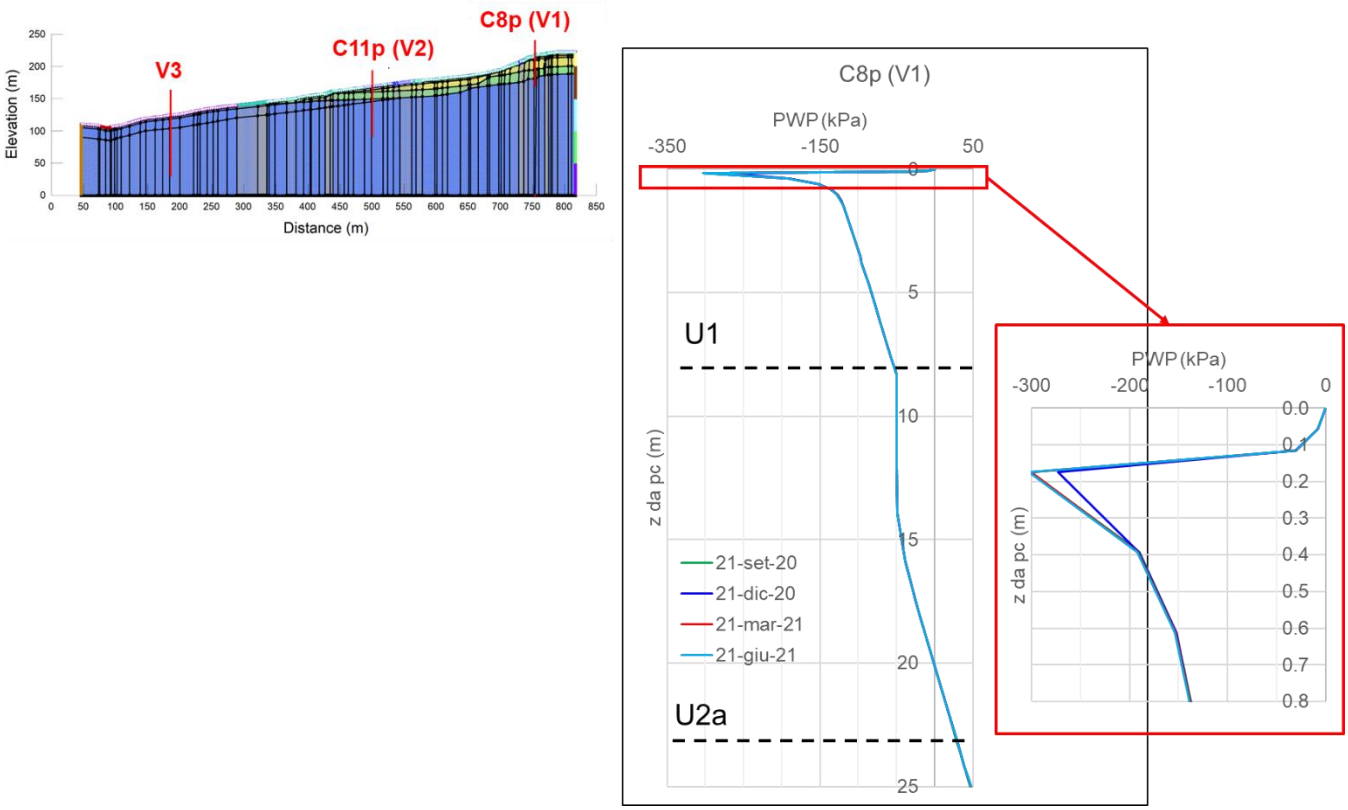


Figura 5.18 Risultati delle analisi di filtrazione transitoria: profilo di PWP lungo la verticale C8p.

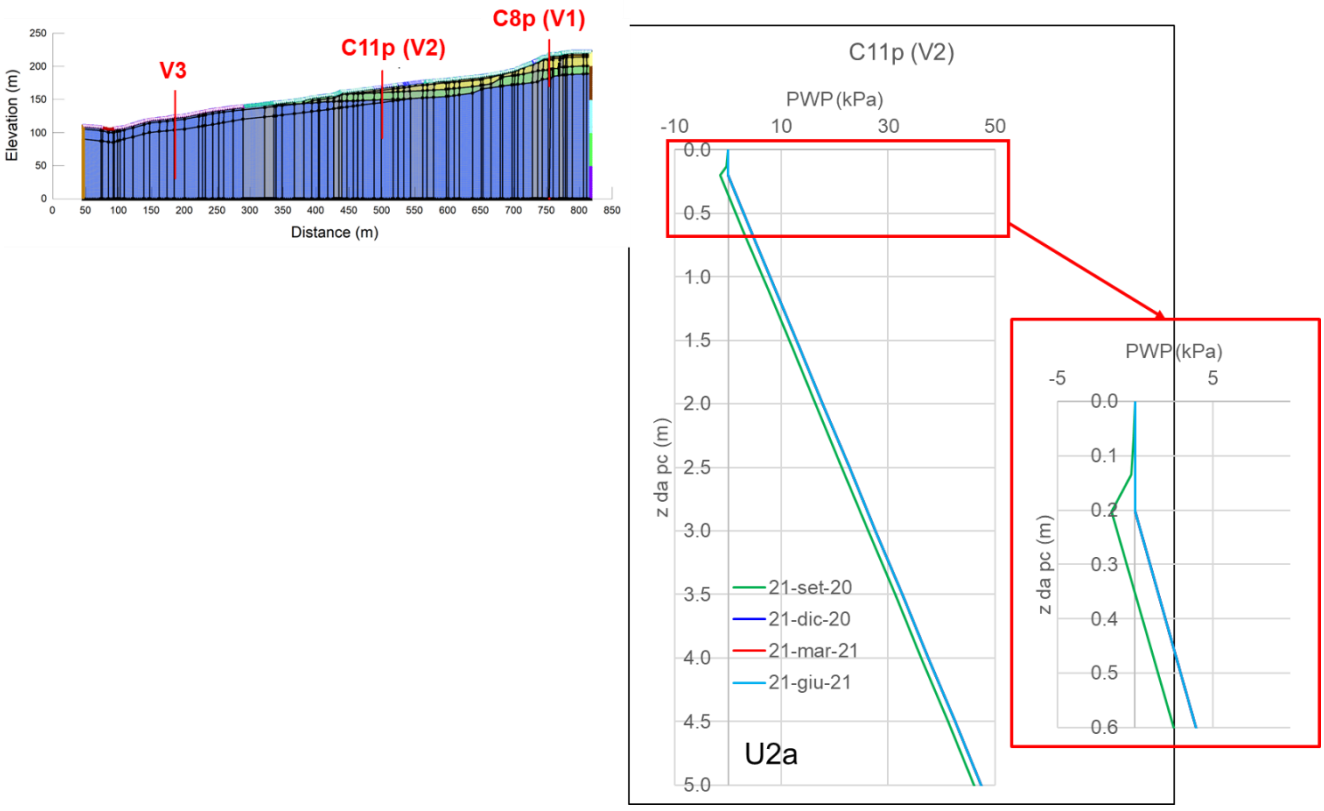


Figura 5.19 Risultati delle analisi di filtrazione transitoria: profilo di PWP lungo la verticale C11p.

Infine, in Figura 6.9 sono mostrati i profili di fine stagione in corrispondenza della verticale V3 di valle. Come discusso per la verticale C8p, anche in questo caso i profili numerici sono affetti entro i primi 15÷20 cm dall'applicazione di un flusso uscente con funzione di riduzione *hm2* al bordo interno. Si osserva che il pelo libero si posiziona tra i 15 e i 20 m di profondità, dunque risulta molto più profonda rispetto a quanto atteso e alle osservazioni di sito. Questo risultato numerico suggerisce l'esigenza di affinare la modellazione del bordo superiore, in particolare con riferimento alla caratterizzazione della funzione di riduzione *hm2* nella zona in cui affiora l'argilla e la coltivazione è di grano, dato che la modellazione probabilmente sovrastima le capacità ritentive di questa unità. La scelta di un valore elevato di s_2, pari a 1500 kPa, nel calcolo di *hm2* comporta infatti maggiore estrazione per evapo-traspirazione, con corrispondente aumento dei valori di suzione nella porzione superiore del profilo, e corrispondente abbattimento del livello di falda.

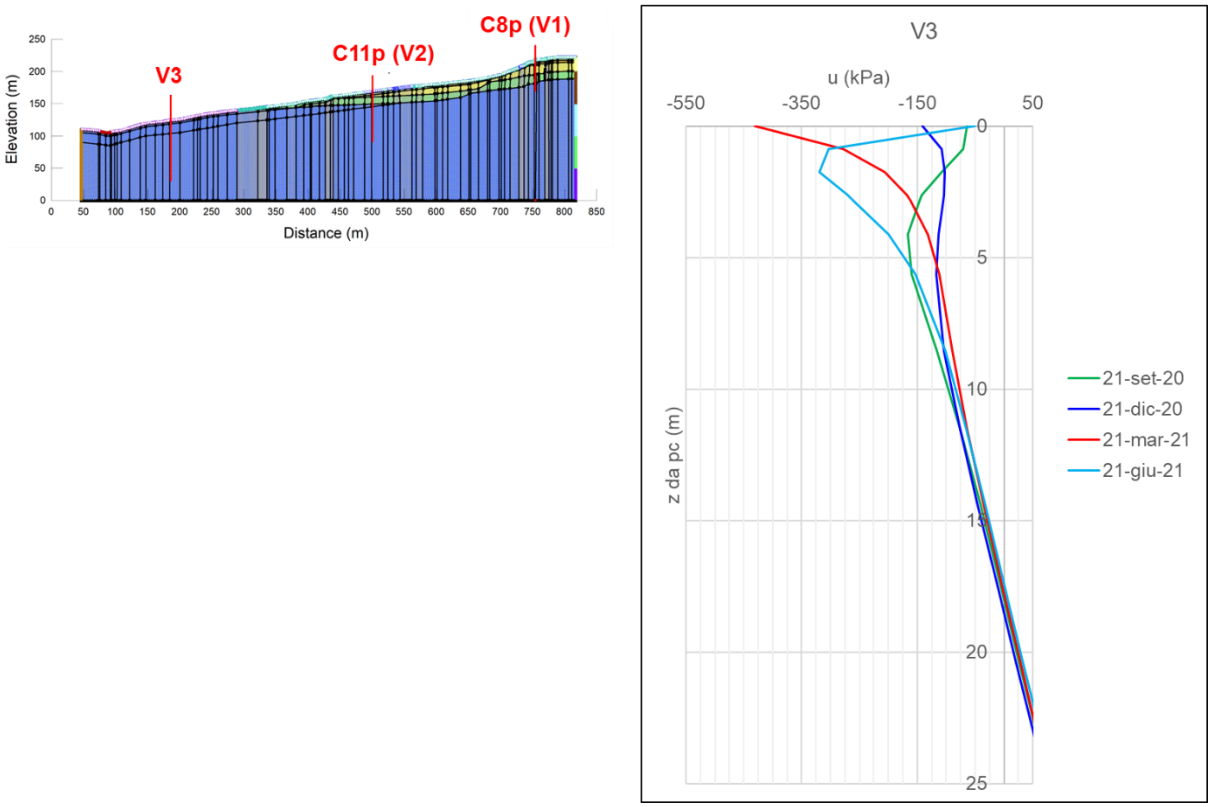


Figura 5.20 Risultati delle analisi di filtrazione transitoria: profilo di PWP lungo la verticale V3.

6.4 Conclusioni

Le analisi di filtrazione transitoria presentate, riferite a un esteso intervallo di analisi (settembre 2015-agosto 2021) e condotte adottando un approccio avanzato di modellazione dei processi di interazione clima-vegetazione, mostrano che l'applicazione di una forzante transitoria al bordo superiore, rappresentativa dell'interazione del versante con la vegetazione e l'atmosfera, non comporta oscillazioni significative dei carichi piezometrici durante l'anno, al variare dei valori della forzante climatica. Le trascurabili fluttuazioni piezometriche osservate suggeriscono il limitato impatto del regime climatico stagionale sui processi di filtrazione nel pendio, dunque la disconnessione del regime idraulico nel versante dal bordo superiore in interazione con l'atmosfera. Le piccole variazioni di pressione interstiziale nel tempo previste dalla

modellazione numerica appaiono, del resto, in accordo con le misure delle celle piezometriche profonde, installate nell'Unità 3; si sono infatti registrate in situ misure di pressione interstiziale, in zone diverse nel pendio e a diverse profondità, poco variabili nel tempo.

Queste considerazioni danno conferma della ridotta incidenza che i processi di interazione pendio-vegetazione-atmosfera esercitano sulla stabilità del versante occidentale di Chieuti, suggerendo di escludere tali processi dalle cause delle accelerazioni degli spostamenti registrati nella parte alta del versante tramite monitoraggio satellitare e tramite la livellazione di superficie (Figura 1.34). In considerazione di ciò, il livello di approfondimento raggiunto dalle analisi descritte è stato ritenuto sufficiente ed ulteriori sviluppi nello studio di questi processi sono stati ritenuti al di fuori degli scopi della presente relazione.

Si ritiene utile ad ogni modo segnalare che un affinamento della strategia di modellazione potrebbe essere perseguito attraverso una migliore caratterizzazione della condizione idraulica al bordo superiore in zona di piede, ossia in corrispondenza dell'affioramento dell'Unità 3: lungo la verticale V3, infatti, i profili numerici di PWP suggeriscono una eccessiva profondità del pelo libero.

7 CONCLUSIONI: POSSIBILI STRATEGIE DI MITIGAZIONE DELLA PERICOLOSITA' DA FRANA NEL VERSANTE

7.1 Indirizzi alle strategie di mitigazione basate sulla diagnosi del meccanismo di frana

La diagnosi del meccanismo di frana che coinvolge il versante oggetto di studio, discussa nei capitoli precedenti della presente relazione, è di indirizzo nell'individuazione delle possibili strategie di intervento volte alla mitigazione del rischio da frana. Quindi, si conclude la presente relazione trattando brevemente tali possibili strategie, in accordo con quanto previsto nella Convenzione.

Come noto, il rischio, R, è il prodotto della pericolosità, H, per la vulnerabilità degli elementi esposti (o di cui è significativa la probabilità di coinvolgimento nella franosità), V, per l'esposizione, E, o valore di tali elementi. Dunque, come noto, il rischio può essere mitigato tramite interventi che riducano l'esposizione, o la vulnerabilità, o la pericolosità, che a sua volta deriva dalla suscettibilità da frana (ossia la predisposizione del versante ad essere coinvolto nel meccanismo di frana), diagnosticata per il versante oggetto di studio nell'intero lavoro scientifico oggetto della Convenzione di cui la presente relazione presenta i risultati finali.

In particolare, l'analisi combinata dei dati inclinometrici, geomorfologici e geomatici, ed i risultati delle analisi numeriche appaiono indicare che nel versante sia attivo un processo franoso antico, che mobilizza oggi resistenze operative nelle bande di taglio di poco superiori alla resistenza residua, che è molto profondo e raggiunge al piede l'affluente del vallone del Fico, e che ha generato una retrogressione della rottura in scarpata oggi molto avanzata. Tale rottura in scarpata ha ivi configurato un'attività franosa significativa e relativamente profonda, che comporta spostamenti in scarpata di componente verticale molto maggiore dell'orizzontale. Data l'acclarata attività dei processi franosi che nel versante oggetto di studio arrivano a coinvolgere ampie porzioni del settore nord-occidentale del centro abitato, un primo intervento di mitigazione del rischio fu posto in essere in forma emergenziale sin dalle prime fasi dell'indagine (Nota di aggiornamento del 28/01/2021 - Prot. N. 650 del 3/02/2021), intervenendo sull'esposizione, E. Infatti, in data 12 marzo 2021 fu attuata un'ordinanza di sgombero dell'area urbana inclusa nel campo di spostamenti da frana alla testa del pendio, collocata tra la scarpata SR-SR2 in Figura 1.63 e le strutture di contenimento (muri su pali). Tale ordinanza ha difatti comportato lo sgombero di diversi edifici, sino ad allora abitati, e l'interdizione della circolazione in alcune vie, riducendo la probabilità di danno alle persone e salvaguardando l'incolumità pubblica e privata.

La diagnosi del meccanismo di frana ad oggi perseguita con le attività di indagine e studio, discusse nelle 2 relazioni già consegnate al Commissario di Governo per l'Emergenza Idrogeologica della Regione Puglia e nella presente relazione finale, oggi permette di definire interventi volti a mitigare il rischio riducendo la pericolosità da frana, H, ossia riducendo l'instabilità in maniera relativamente duratura ed estensiva. Dunque, coerentemente con l'oggetto della Convenzione di cui alla presente relazione, nel seguito si propongono degli scenari di intervento funzionali alla riduzione della pericolosità da frana nel versante, basati sulla diagnosi perseguita.

Val la pena però evidenziare che, per una data diagnosi di meccanismo di frana, sono molteplici i possibili interventi di mitigazione della pericolosità. Infatti, la diagnosi di un meccanismo di frana implica il riconoscimento delle cause predisponenti e innescanti (Cascini et al. 2005, Cascini 2008, Fell et al. 2008,

Cotecchia et al. 2014, 2016), e gli interventi di mitigazione utili possono diversificarsi in quanto volti a ridurre combinazioni diverse tra le cause di instabilità, o poiché intervengono in maniera diversa sulle stesse cause, come discusso nelle Linee Guida AGI-ISPRA sulla 'Progettazione degli Interventi per la Mitigazione del Rischio da Frana' (pubblicate nel 2022 ed a cui si rimanda per gli aspetti di progettazione). Nel presente capitolo, quindi, più che fornire indicazioni o prescrizioni per la progettazione degli interventi sul versante, si forniscono indirizzi metodologici su come, per il versante in esame, si possa aumentare la stabilità incidendo su una o l'altra delle cause diagnosticate. D'altronde, la scelta dell'intervento di mitigazione per il versante esula dall'oggetto della Convenzione di cui alla presente relazione, in quanto di responsabilità del progettista, dunque, condizionata da una serie di presupposti e vincoli in sede di affidamento della progettazione, che non sono fattori contemplabili a priori.

Secondo la prerogativa dianzi rievocata, nel seguito si richiamano le cause predisponenti l'attività franosa odierna nel versante, come anche alcune delle cause innescanti che perdurano nel determinare variazioni di equilibrio cui conseguono accelerazioni degli spostamenti (evidenziati nel capitolo 1, §1.1), già anticipate nei capitoli precedenti, e si mette in luce come la mitigazione di tali cause possa ridurre la suscettibilità da frana. Inoltre, a titolo esemplificativo, si schematizzano gli effetti di alcuni tra i possibili scenari di intervento atti ad aumentare il fattore di sicurezza sia dei corpi oggi più instabili nel versante (vedasi capitoli 1 e 4), sia di altri corpi di frana potenziali. Si è ritenuto di avanzare esempi di mitigazione della suscettibilità, anziché della vulnerabilità, in quanto attualmente l'edificato e le strade vulnerate dal dissesto giacciono all'interno del bacino di frana, in massima densità tra il ciglio del versante e la scarpata SR-SR2 di retrogressione (Figura 1.62). Quindi, la mitigazione della loro vulnerabilità richiede comunque la mitigazione dell'instabilità, ossia dell'attività dei corpi franosi che oggi genera il campo di spostamenti nelle aree di fondazione delle strutture e delle infrastrutture. Il ripristino dell'uso dell'area di scarpata richiede, quindi, necessariamente la stabilizzazione. Val la pena però rimarcare che, per processi franosi di complessità quale quella del processo nel versante in esame, gli interventi che conseguono una mitigazione della suscettibilità non comportano necessariamente l'azzeramento degli spostamenti sul lungo periodo. Quindi, si suggerisce che le scelte d'uso dell'area in scarpata siano svolte successivamente ad un monitoraggio post-operam, ossia successivo alla messa in opera degli interventi di mitigazione che si sceglierà di attuare.

Venendo alle cause predisponenti, l'analisi dei dati di monitoraggio piezometrico (capitolo 3), insieme alle simulazioni numeriche della filtrazione nel pendio (capitoli 4 e 6), hanno fornito evidenza di elevati carichi piezometrici nei terreni che formano l'Unità 3 e parte della Sub-unità 2b nel versante. Dunque, nelle bande di taglio che confinano i corpi di frana parte del meccanismo franoso, sintetizzato nel §1.5 e verificato nel capitolo 4, le resistenze disponibili sono ridotte da significative pressioni interstiziali, rispetto ai valori che potenzialmente potrebbero essere disponibili. Queste valutazioni fanno riconoscere il regime piezometrico nel versante, e quindi la filtrazione che lo determina, quale causa predisponente l'instabilità. In particolare, gli elevati carichi piezometrici nelle argille dell'Unità 3 predispongono all'instabilità i corpi attivi P2, P1 e P1*, i cui spostamenti predispongono all'instabilità i corpi in scarpata C3, C2 e C1, qui elencati secondo la gerarchia di instabilità (Figura 1.63 e Figura 4.3). Si può quindi ritenere che interventi mirati alla riduzione dei carichi

piezometrici in profondità nel versante favorirebbero l'incremento della stabilità sia dei corpi profondi di valle, che dei corpi in scarpata.

Come noto, ove gli interventi per la riduzione dei carichi piezometrici aumentano le resistenze disponibili al numeratore del fattore di stabilità, gli interventi strutturali, in alternativa, riducono le resistenze mobilizzate al denominatore di detto fattore. Nel caso in esame, però, interventi strutturali atti a mitigare l'attività dei corpi franosi profondi di valle, P2, P1, P1*, necessiterebbero la messa in opera, ad esempio, di più diaframmi di pali trasversali al versante, collocati a diverse quote e con pali tanto lunghi da attraversare significativamente i terreni sottostanti le bande di taglio profonde. Si evince quindi come tale tipologia di intervento sia di difficile sostenibilità, data la grande profondità ed estensione dei corpi franosi. Per i corpi in scarpata, Ci (capitolo 4), la sola adozione di opere strutturali di contenimento appare altrettanto insostenibile per più ragioni. Una di queste è ancora l'elevata profondità delle bande di taglio di tali corpi. Per il corpo C3 (Figura 4.4), ad esempio, la profondità della banda di taglio renderebbe necessaria la messa in opera di diaframmi più profondi di 50-60 m. Per essi, inoltre, sarebbero necessari tiranti di grande lunghezza, con ancoraggi nei terreni a monte delle bande di taglio, il cui ammorsamento però farebbe paventare l'innesco di ulteriore retrogressione della rottura. Ragione ancor più importante risiede inoltre nel fatto che il ruolo stabilizzante dei diaframmi è affidato al contenimento a questi fornito dai terreni a valle (per mobilizzazione delle resistenze passive), ma nel caso in esame tale contenimento non è garantito, poiché i terreni a valle sono a loro volta parte di corpi di frana in lento movimento e non possono fornire il contenimento passivo richiesto. Per svolgere un adeguato ruolo di contenimento, quindi, i diaframmi citati dovrebbero essere approfonditi sino a quote di molto inferiori a quelle delle bande di taglio che circoscrivono i corpi di frana di valle, es. il corpo P1, il che comporterebbe profondità di infissione molto elevate. Si riconosce, quindi, che in ogni caso una stabilizzazione dei corpi di valle è premessa della mitigazione dell'instabilità dei corpi in scarpata, anche se si mettessero in opera delle opere di contenimento alla testa del versante per fornire ulteriore contenimento locale. Non si può infatti escludere che l'esecuzione di opere di contenimento in scarpata, successiva alla mitigazione dell'attività dei corpi di valle, possa nel lungo termine contribuire alla mitigazione della retrogressione ulteriore della rottura.

Ritornando, alla mitigazione della suscettibilità da frana nella parte di valle del versante, nel presente capitolo si discutono, a titolo esemplificativo, dei possibili interventi di drenaggio che possano ridurre, in maniera pervasiva e sino a grandi profondità, i carichi piezometrici, aumentando le resistenze disponibili e la stabilità. Si discutono anche degli interventi di riprofilatura che possono indurre una riduzione delle resistenze mobilizzate, contribuendo all'aumento dei fattori di sicurezza dei corpi ritenuti più attivi e di copri di potenziale instabilità.

Si deve però qui evidenziare che, in aggiunta al drenaggio profondo, si considerano molto utili interventi di regimazione dei deflussi superficiali sul pendio, essendosi riscontrato che l'attuale deflusso delle acque di superficie è a luoghi caotico, soprattutto nella zona di piede, e risulta favorevole all'infiltrazione delle acque meteoriche che ricaricano la filtrazione in profondità. D'altronde, come discusso nel capitolo 3, l'assetto stratigrafico fa sì che una portata cospicua nelle Sub-unità 2a e 2b, di maggiore permeabilità, sgorghi a metà pendio, come ad esempio alla sorgente Crojo, o lungo la linea di sorgive lungo la scarpata SR0 (Figura 7.1),

sversandosi sulle argille affioranti a valle ed ivi generando frequenti fasi di impaludamento. Tali impaludamenti comportano alimentazione dell'infiltrazione nella zona di piede del versante, che contribuisce agli elevati carichi piezometrici nella banda di taglio del corpo P2, e quindi alla sua attività, che a catena incide sull'attività della sequenza di corpi, da valle verso monte: P1, P1*, o C3 (Figura 1.63).



Figura 7.1 Foto della linea di sorgive lungo la scarpata SR0

Risulta, quindi, chiaro come sia importante attuare degli interventi di regimazione delle acque di superficie, o delle acque di circolazione ipogea poco profonda (es. esecuzione di canalette di scolo, di dreni superficiali di intercettazione ecc.), che possano minimizzare l'infiltrazione delle acque superficiali.

Val la pena anche evidenziare come un contributo alla riduzione dei carichi piezometrici in profondità possa derivare da una modifica nell'uso del suolo sul versante, cambiando le specie vegetate ivi presenti. Di recente, infatti, si sta sempre più riconoscendo l'utilità di *nature-based solutions* per la mitigazione del rischio da frana nei casi in cui l'infiltrazione dell'acqua è causa predisponente l'instabilità. Si ritiene che possa valere la pena l'indagine di come vegetazione di diversa natura, ad esempio densa arbustiva e fortemente traspirativa, possa aumentare l'intercezione fogliare delle acque di pioggia, trattenendole rispetto all'infiltrazione, ed aumentare le portate traspirative, che risultano negative nel bilancio di infiltrazione, riducendo complessivamente la portata di infiltrazione netta durante l'anno.

Infine, ove si è già citata dianzi la valenza di interventi di riprofilatura del versante, che prevedono una movimentazione dei terreni con asportazione delle masse nella parte di monte e loro collocazione nella parte di valle del versante, si evidenzia come nel contesto della sistemazione dei terreni a valle sarà necessario un intervento di contenimento delle aste torrentizie tributarie del vallone del Fico, oggi sede di alti tassi di erosione lungo le sponde. Come richiamato nel Capitolo 1, infatti, si ritiene che il carattere pulsante dell'attività dei

movimenti sul versante, ossia il verificarsi di fasi di accelerazione del campo di spostamenti (Figure Figura 1.6 e Figura 1.8), possa essere connesso, almeno in parte, ad una progressione nel tempo dello scavo al piede lungo la sponda in destra idraulica del fosso che borda il corpo P2, comune al P1 e P1* (Figura 1.25). Ivi l'erosione in sponda genera uno scavo progressivo nel tempo, che genera uno scarico al piede dei corpi di frana, cui consegue necessariamente un aumento delle resistenze al taglio mobilizzate e una corrispondente riduzione del fattore di sicurezza, plausibilmente riflessa in accelerazioni intermittenti degli spostamenti.

Nel seguito si valuta l'efficacia di alcuni tra i vari possibili interventi di drenaggio e riprofilatura, calcolando l'incremento del fattore di sicurezza che tali interventi possono generare. Allo scopo, sono state eseguite analisi dell'equilibrio limite che implementano il regime delle pressioni interstiziali derivante dalla simulazione del processo di filtrazione stazionaria in presenza degli interventi di drenaggio (modellazione H+LEM). Nello specifico, si è svolto uno studio parametrico per la valutazione degli effetti sull'assetto piezometrico e sulla stabilità del corpo profondo P1* indotti da un sistema di dreni sub-orizzontali, di lunghezza ed inclinazione variabile. Inoltre, si è valutata l'efficacia di un possibile intervento di riprofilatura del pendio, che prevede uno scarico nella porzione di monte, realizzato abbattendo alcuni edifici, asportando parte del terreno di riporto e degli strati superficiali a tergo delle opere di sostegno, ed un caricamento della porzione di valle, in prossimità del corpo idrico.

Le analisi numeriche sono state svolte con riferimento alla sezione CC′ (Figura 7.2), lungo la quale i corpi di frana esaminati risultano essere maggiormente instabili, come illustrato nel capitolo 4 (§4.3). Per la valutazione dell'efficacia dell'intervento di riprofilatura è stata considerata anche la sezione 1AC, in ragione della maggiore interazione dell'edificato con la scarpata SR2 del corpo di frana P1* lungo tale sezione.

Si rimarca, però, che altri interventi di drenaggio profondo e di riprofilatura, eventualmente combinati con interventi strutturali, possono risultare altrettanto, o più efficaci, di quelli di seguito esemplificati (ad esempio esecuzione di pozzi profondi nel versante, o interventi con pozzi a monte, nelle aree di alimentazione a Sud, ecc). Infatti, quanto nel seguito va considerato solo come esempio di carattere essenzialmente metodologico circa l'uso, ai fini della mitigazione, della diagnosi del meccanismo di frana sin qui presentata, coerentemente all'oggetto della Convenzione, coincidente con la definizione di tale diagnosi.

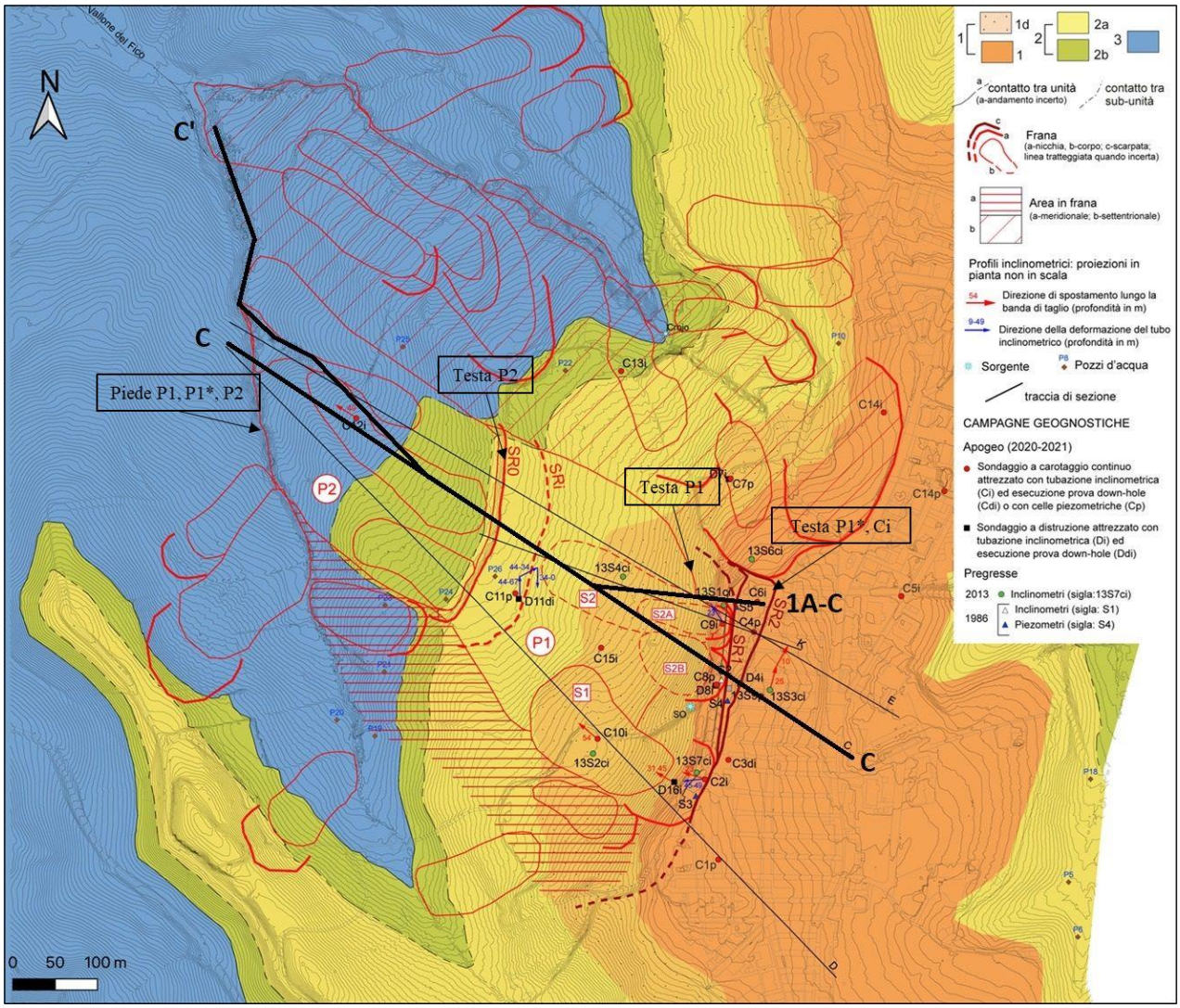


Figura 7.2 Carta litostratigrafico-geomorfologica del versante Ovest del comune di Chieuti con le tracce delle sezioni esaminate per la valutazione dell'efficacia degli interventi di mitigazione del rischio da frana

7.2 Esempio di intervento di drenaggio profondo

7.2.1 Modifica dell'assetto piezometrico tramite dreni sub-orizzontali

Allo scopo di valutare l'incidenza di un sistema di drenaggio profondo sull'assetto piezometrico del pendio e, di conseguenza, sulla stabilità dei corpi di frana esaminati, sono state eseguite analisi numeriche della filtrazione stazionaria in presenza di dreni sub-orizzontali posizionati lungo tutto il pendio. Occorre rimarcare che sono state eseguite analisi di filtrazione bidimensionale, modellando l'effetto che i dreni conferiscono alla filtrazione lungo la sezione longitudinale in condizioni di filtrazione piana. In realtà l'intervento di cui si modellizza l'effetto in termini bidimensionali dovrebbe configurarsi come una o più file di dreni paralleli, giacenti, per ogni fila di dreni, in un piano perpendicolare alla sezione di analisi. Quindi, l'effetto modellizzato nella sezione longitudinale per ogni fila di dreni rappresenta la mitigazione dei livelli piezometrici nel piano verticale in cui giace un singolo dreno, assumendo che non ci sia alimentazione normale al piano di filtrazione (per richiamo da parte del dreno). Ma va considerato che nel volume di interasse tra le sezioni verticali passanti per ogni dreno, la riduzione dei livelli piezometrici sarà inferiore a quella prevista dal calcolo. Le analisi,

infatti, non hanno trattato quanto debba valere l'interasse minimo, tra i dreni di ogni fila, atto a massimizzare la riduzione dei livelli piezometrici nel volume di interasse, aspetto da contemplarsi nella progettazione.

Le analisi idrauliche sono state svolte parametricamente, variando la lunghezza dei dreni e la loro inclinazione. Nello specifico, in una prima fase sono state svolte 22 analisi, in ognuna delle quali si è attivato 1 dreno sub-orizzontale. Tali analisi differiscono per posizione del dreno, sua lunghezza, variabile tra 100, 200 e 300 m, e per sua inclinazione, pari o al 3% o all'8%. La Figura 7.3 illustra la disposizione dei dreni per ognuno dei quali è stato condotto un set di analisi. In Figura è anche mostrata la numerazione progressiva dei dreni da valle verso monte. Le analisi sono state eseguite attivando ciascun dreno singolarmente, per valutare le variazioni di incidenza sulla distribuzione delle pressioni interstiziali, e di conseguenza sulla stabilità dei corpi di frana, connesse alla collocazione del dreno. Si è partiti con la valutazione degli effetti sulla stabilità del corpo profondo P1*.

Il modello numerico adottato è quello illustrato nel Capitolo 4 della presente relazione, con le condizioni al contorno idrauliche descritte in maniera dettagliata nel §4.3.1, che prevedono: un carico variabile con la profondità da 205 m a 220 m s.l.m. (scalettato 2, Figura 4.10) sul bordo verticale di monte; un carico costante pari a 81 m s.l.m. sul bordo verticale di valle; drenaggio libero lungo il piano campagna del pendio; condizione u=0 kPa in corrispondenza dell'intersezione della sezione con l'affluente del vallone del Fico; bordo inferiore impermeabile.

I dreni sono stati simulati applicando la condizione di drenaggio libero lungo la linea che li rappresenta (è permesso all'acqua di uscire dai nodi, ma non di entrare). Tale condizione garantisce che, nei nodi del dreno in cui il carico idraulico è maggiore della quota del nodo, venga imposta pressione interstiziale nulla, mentre nei nodi in cui il carico idraulico è minore della quota del nodo si conserva la condizione di flusso nullo.

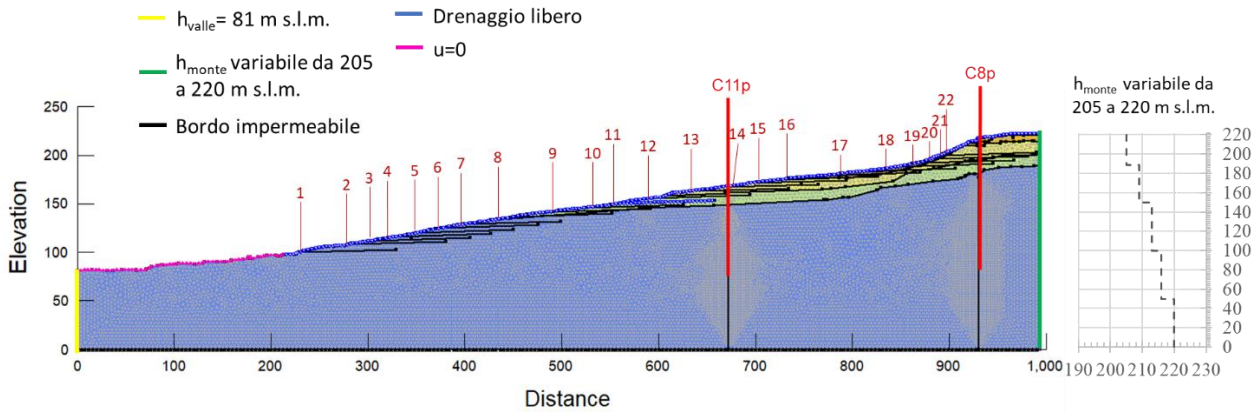


Figura 7.3 Sezione CC': modello numerico FEM (mesh di calcolo e condizioni al contorno) per le analisi di filtrazione con dreni sub-orizzontali di lunghezza pari a 100 m e inclinazione 3%.

Poiché il modello numerico ha una lunghezza di circa 1000 m a partire dal bordo di valle, l'inserimento nella parte alta del pendio di dreni di lunghezza 200 m, o 300 m, risulta vincolata dall'estensione del modello di calcolo. Per questa ragione, le analisi di filtrazione sono state eseguite introducendo: i) dreni di 100 m di lunghezza dal 1 al 22; ii) dreni di 200 m dal 1 al 17; iii) dreni di 300 m dal 1 al 14.

Le caratteristiche idrauliche dei terreni sono quelle descritte nel §4.2 (*Tabella 4.4*). Nella porzione sopra falda, la risposta idraulica dei terreni è governata dalle curve di ritenzione e di conducibilità idraulica, già illustrate nella Figura 4.7 del capitolo 4. L'incremento della resistenza a taglio dovuta alla suzione è tenuta in conto attraverso le curve di ritenzione e i parametri efficaci della resistenza del terreno, come proposto dalla formulazione di Vanapalli et al. (1996):

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a)\tan(\varphi') + (u_a - u_w)\left[\left(\frac{\theta_w - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}}\right)\tan(\varphi')\right] \quad (7.1)$$

dove il contributo della suzione alla resistenza al taglio τ_f è funzione del contenuto d'acqua volumetrico θ_w normalizzato rispetto ai valori a saturazione e residuo.

L'assetto piezometrico risultante dall'attivazione di ogni singolo dreno è illustrato nel seguito in termini di distribuzione delle linee equipotenziali, dei vettori di velocità di flusso e dei profili delle pressioni interstiziali lungo le due verticali di monitoraggio piezometrico, C8p e C11p. In particolare, nelle Figura 7.4 e Figura 7.5 sono rappresentati i risultati della filtrazione nell'ipotesi di attivazione dei dreni di 100 m di lunghezza e pendenza 3% nelle diverse posizioni: 1 (nell'Unità 3, Figura 7.4a), 11 (nella sub-Unità 2b, Figura 7.4b), 15 (nella sub-Unità 2a, Figura 7.4c) e 20 (attraversante la sub-Unità 2a e l'Unità 1, Figura 7.4d). Si osserva come la filtrazione sia fortemente sensibile alla posizione del dreno sub-orizzontale lungo il pendio. In particolare, la realizzazione dei dreni nelle posizioni 1 e 11 incide maggiormente nel ridurre i livelli piezometrici nella porzione di valle del pendio, nell'area in prossimità dell'affluente del vallone del Fico (si veda l'area compresa tra le ascisse 300 m e 400 m del modello per il dreno 1, in Figura 7.4a). Viceversa, l'attivazione del dreno nella porzione di monte (dreno 20 in Figura 7.4d) produce una riduzione dei carichi nella zona di scarpata, con una distorsione delle linee equipotenziali indicativa di un aumento della componente del flusso dal basso verso l'alto, che va verso il dreno. Con tale dreno il pelo libero si attesta, nella porzione di monte del pendio, interamente nella sub-Unità 2b (a quota inferiore al contatto tra la sub-Unità 2a e la 2b). La realizzazione del dreno nella posizione 15 (Figura 7.4c), invece, produce una riduzione dei carichi piezometrici principalmente nella parte centrale a metà pendio, a monte della scarpata SR0.

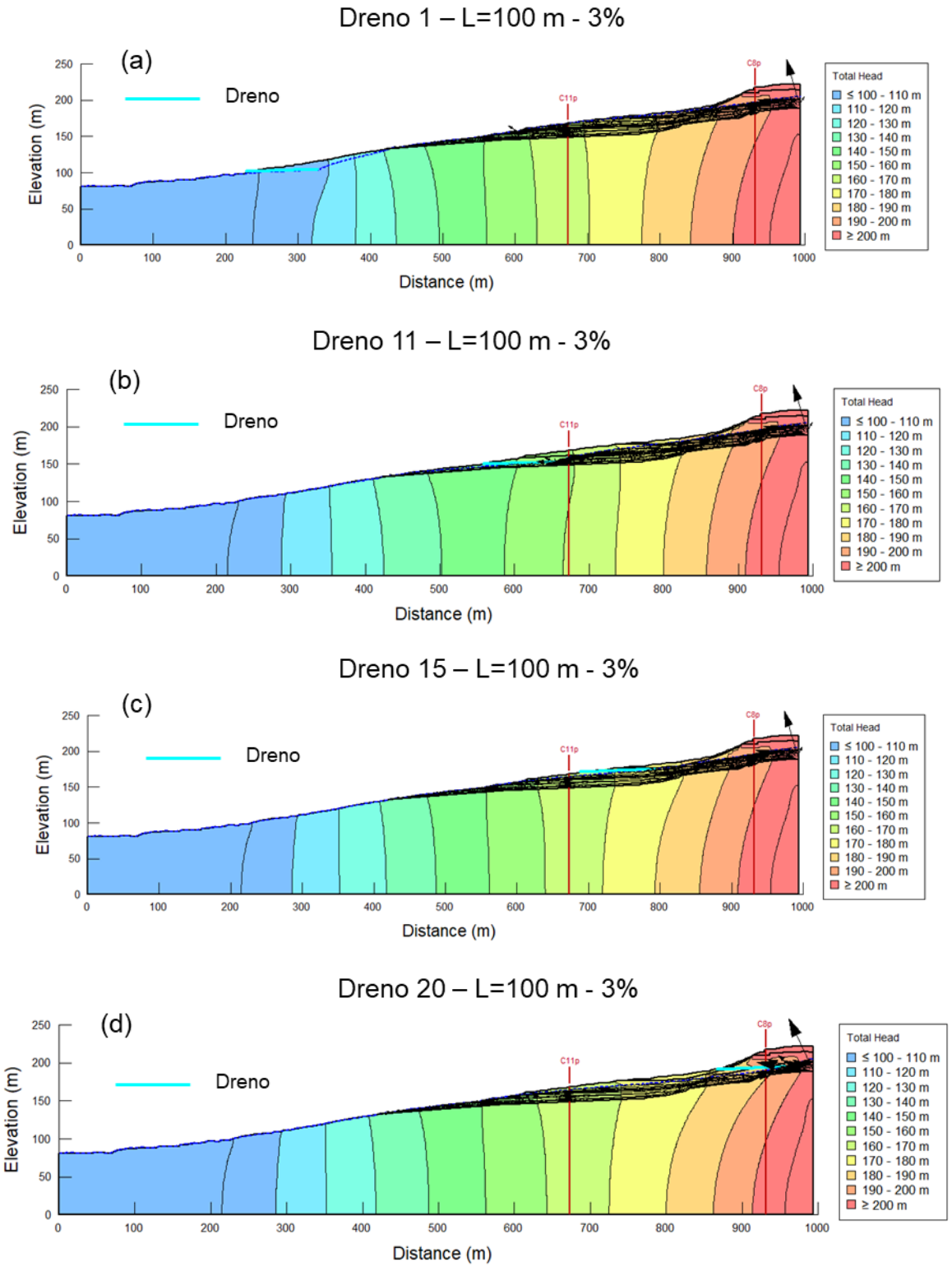


Figura 7.4 Intervento di drenaggio: linee equipotenziali e vettori di velocità di flusso corrispondenti alla filtrazione stazionaria nel caso in cui il dreno (L= 100 m e i=3%) sia attivato nello strato dell'unità 3 (a – dreno 1), nella Sub-unità 2b (b – dreno 11), nella Sub-unità 2a (c – dreno 15) e attraversi la Sub-unità 2a e l'unità 1 (d – dreno 20)

Il profilo delle pressioni interstiziali lungo la verticale C8p (Figura 7.5a) risulta poco influenzato dalla presenza del dreno in posizione 1, 11 e 15, mentre l'attivazione del dreno più a monte, in posizione 20, comporta una

significativa riduzione delle pressioni interstiziali (di circa 80 kPa) lungo tale profilo, ed il corrispondente abbassamento del pelo libero (a circa 28 m da p.c. rispetto ai 22 m in assenza di dreni – "filtrazione attuale" nel Capitolo 4). Le pressioni interstiziali si riducono significativamente lungo la verticale a metà pendio C11p (Figura 7.5b) se si attiva il dreno nello strato della Sub-unità 2b (dreno 11) in prossimità della verticale indagata. Il dreno più a valle, dreno 1, e il dreno 15 a monte non modificano in modo particolare il profilo delle pressioni interstiziali lungo questa verticale, mentre una riduzione dei carichi piezometrici si ottiene anche lungo tale verticale col dreno più a monte, 20, nella sub-Unità 2a, che quindi appare di efficacia più pervasiva.

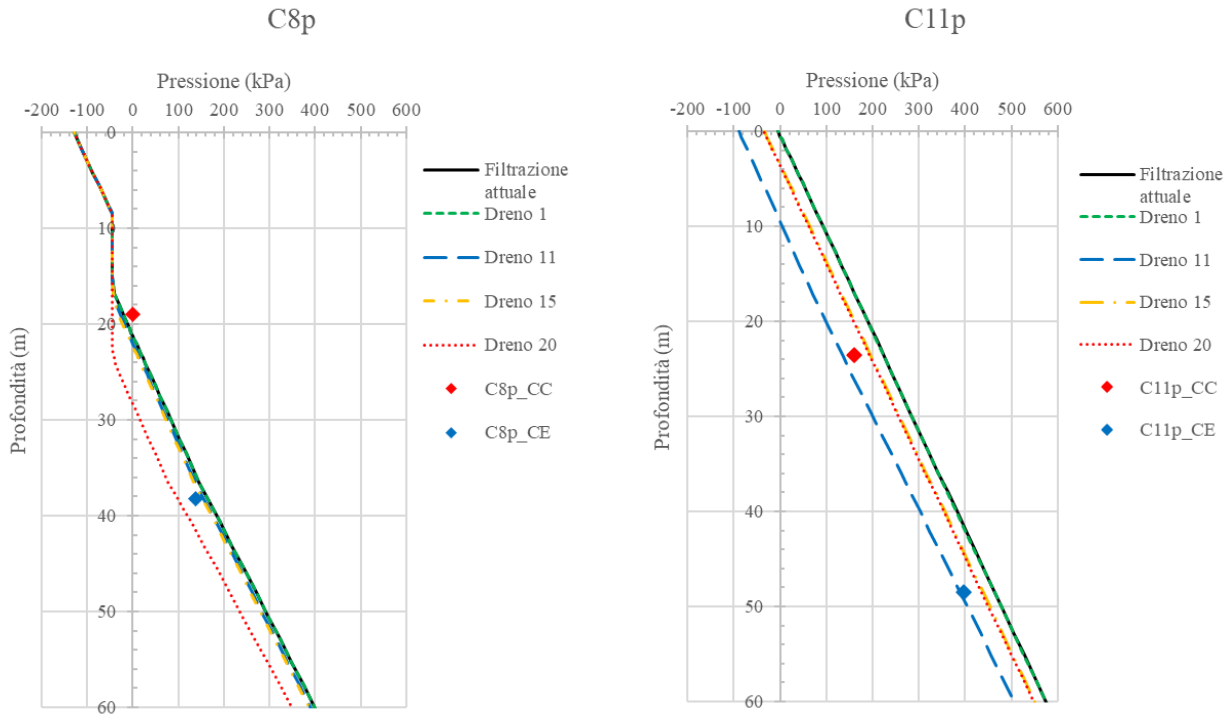


Figura 7.5 Profili delle pressioni interstiziali lungo le due verticali di indagine C8p e C11p risultanti dall'attivazione dei dreni 1, 11, 15 e 20 confrontati con quelli derivanti con la filtrazione attuale

In Figura 7.6 è illustrato un confronto dell'assetto piezometrico ottenuto da analisi di filtrazione condotte attivando il dreno 11 a metà pendio (nella sub-Unità 2b), per diverse caratteristiche geometriche di tale dreno. È stato considerato il dreno in posizione 11 di lunghezza 100 m ed inclinazione 3% e 8% (Figura 7.6a, b) e quello di lunghezza 300 m ed inclinazione del 3% e 8% (Figura 7.6c, d). L'analisi dei risultati mostra come, a parità di lunghezza, la minore inclinazione del dreno comporti un maggiore approfondimento del pelo libero ed una conseguente più significativa riduzione dei livelli piezometrici nella zona a metà pendio. A parità di inclinazione, invece, una maggiore lunghezza del dreno causa una più significativa riduzione dei carichi piezometrici in profondità ed un significativo abbassamento del pelo libero nella porzione centrale del pendio. Una stima dell'abbattimento dei carichi piezometrici in profondità può essere fatta osservando i profili delle pressioni interstiziali lungo la verticale C11p, prossima alla posizione del dreno 11. Infatti, il confronto tra i profili delle pressioni interstiziali (Figura 7.7) evidenzia una più significativa variabilità lungo la verticale C11p, a fronte della minore variabilità delle pressioni interstiziali lungo la verticale C8p, in ragione della posizione a metà pendio del dreno considerato, che influenza meno la porzione di monte. Comunque, è possibile osservare una variazione della posizione del pelo libero (u=0 kPa) lungo la verticale C8p da 22 m a

24 m di profondità quando la lunghezza del dreno è di 300 m, indipendentemente dalla sua inclinazione (Figura 7.7a). Lungo la verticale C11p, invece, rispetto al regime delle pressioni interstiziali ottenuto per 'filtrazione attuale', per cui il pelo libero è in affioramento, si osserva un significativo abbassamento del pelo libero quando si attiva il dreno 11.

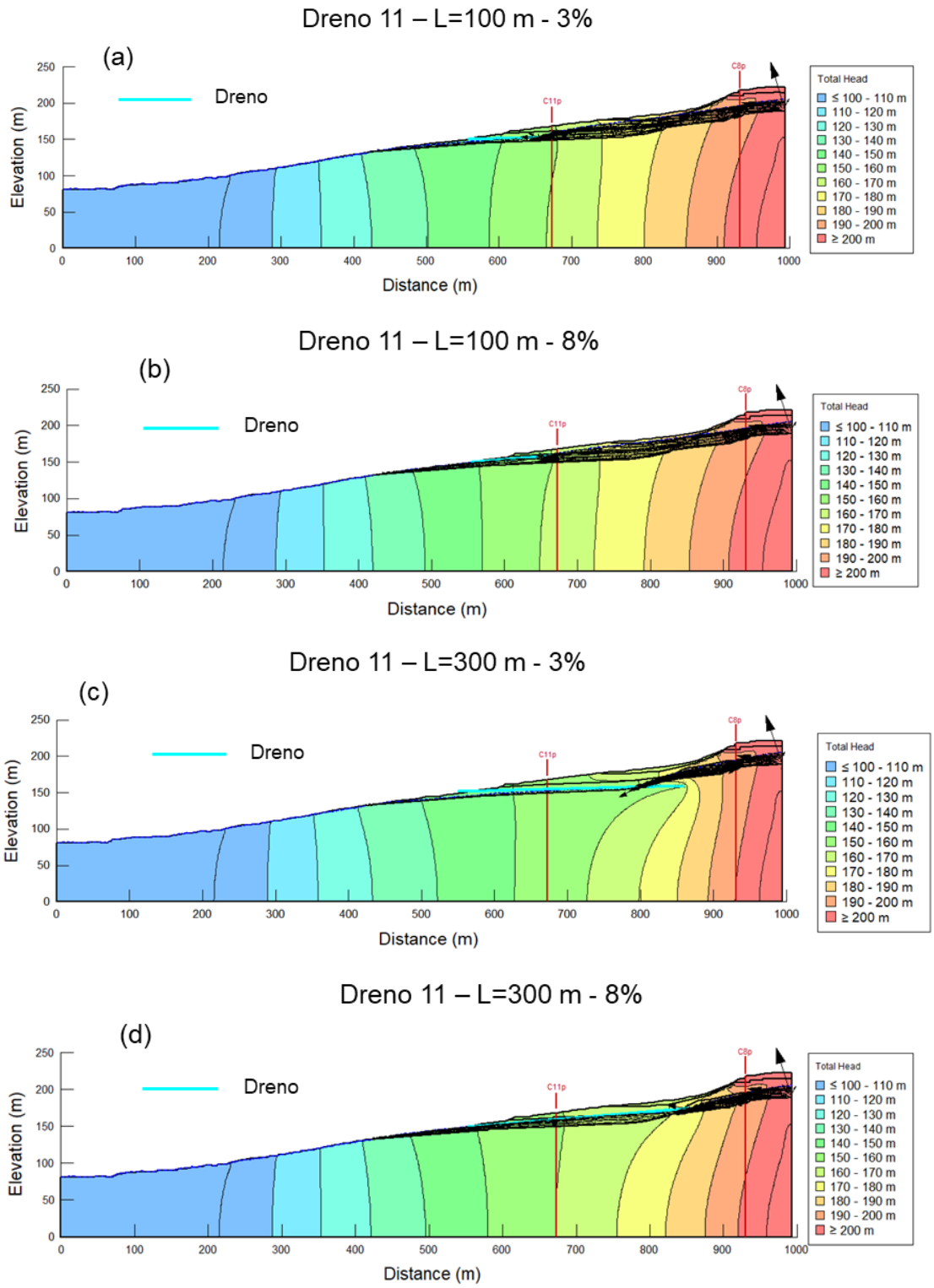


Figura 7.6 Intervento di drenaggio: linee equipotenziali e vettori di velocità di flusso risultanti dalla filtrazione in cui si è attivato il dreno sub-orizzontale n. 11 di lunghezza e inclinazioni differenti: (a) L=100 m, i=3%; (b) L=100 m, i=8%;(a) L=300 m, i=3%;(a) L=300 m, i=8%;

In particolare, le pressioni interstiziali subiscono un cospicuo decremento in seguito all'attivazione del dreno; il pelo libero raggiunge la profondità di 16 m da p.c. se il dreno attivato è lungo 300 m ed inclinato del 3% (Figura 7.7b). Si osserva, inoltre, che per il dreno di 100 m la variazione dell'inclinazione da 8 a 3% produce un abbassamento del pelo libero da 6 m a 10 m da p.c., mentre per il dreno di 300 m, la posizione del pelo libero passa da circa 10 m, quando il dreno è inclinato dell'8%, a circa 16 m, se il dreno è inclinato del 3%.

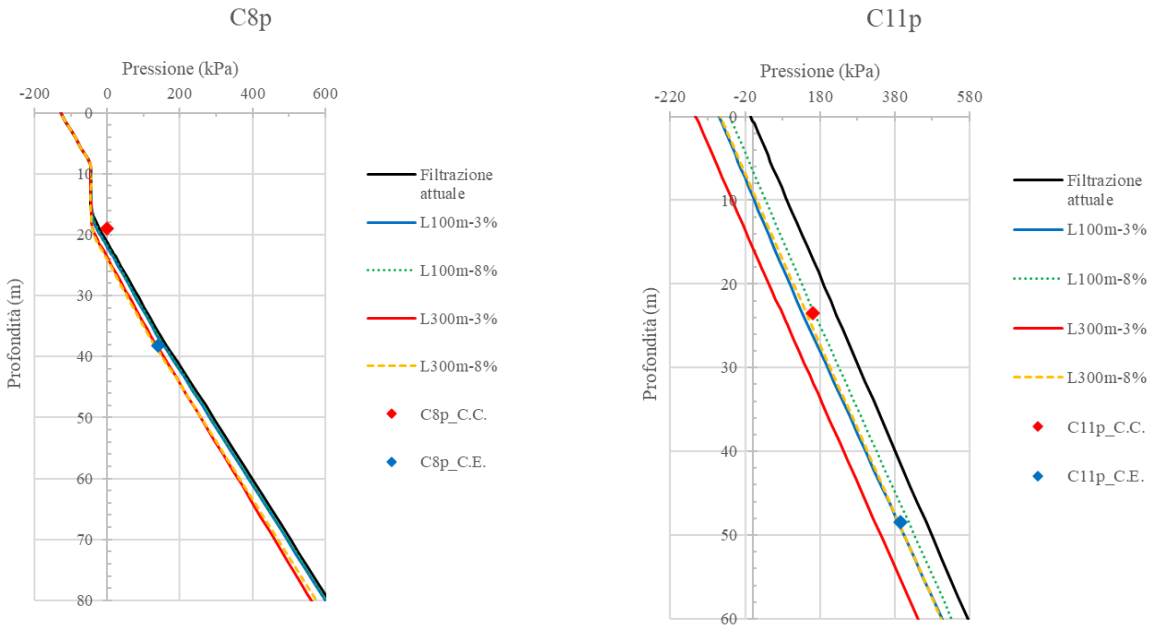
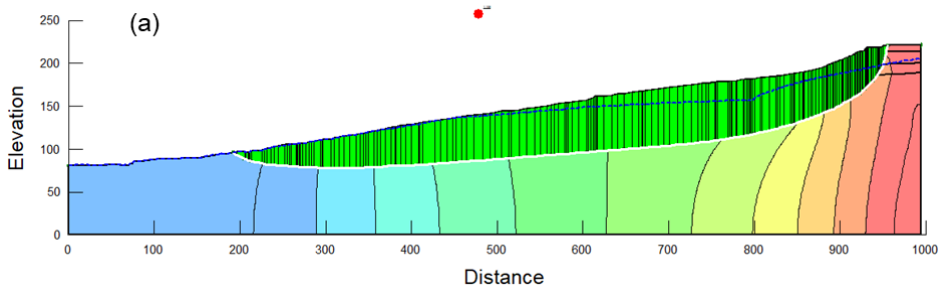


Figura 7.7 Profili delle pressioni interstiziali lungo le due verticali di indagine C8p e C11p risultanti dall'attivazione del dreno 11 avente diverse lunghezze ed inclinazioni

7.2.2 Incidenza dei dreni sub-orizzontali sulla stabilità dei corpi di frana

Allo scopo di valutare l'incidenza della riduzione dei livelli piezometrici indotta dai dreni sub-orizzontali sulla stabilità dei corpi di frana, sono state eseguite analisi LEM per la determinazione del fattore di sicurezza; in particolare si sono svolte analisi per il corpo profondo P1* (Meccanismo di tipo 1) e per il corpo in scarpata C3 (Meccanismo di tipo 2), le cui sagome sono mostrate in Figura 7.8. L'assetto piezometrico risultante da ciascuna analisi di filtrazione, eseguita attivando singolarmente i dreni di geometria differente, è stato implementato nelle analisi LEM, condotte con il metodo di Morgenstern & Price.



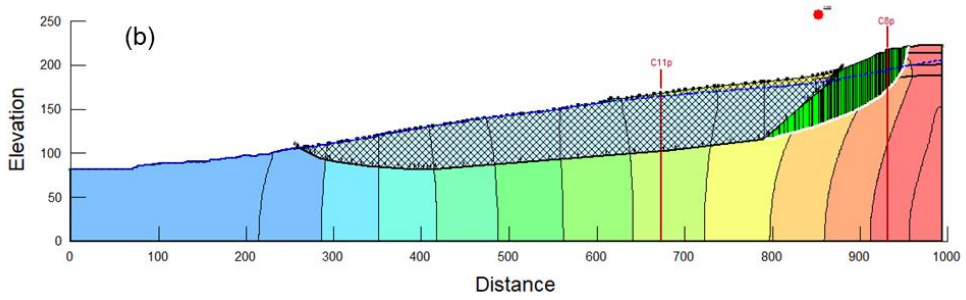


Figura 7.8 Morfologia dei corpi esaminati mediante analisi LEM: (a) corpo profondo P1 (Meccanismo di tipo 1); (b) corpo in scarpata C3 (Meccanismo di tipo 2)*

Ai materiali delle diverse unità sono stati assegnati i parametri di resistenza a taglio contemplati nelle analisi a ritroso discusse nel §4.3, in cui per le unità 1 e 2a sono stati assegnati i valori medi delle resistenze ultime, mentre per l'unità 2b sono stati assegnati o l'estremo superiore dell'intervallo di variazione dell'angolo di resistenza determinato da prove di taglio diretto ciclico per l'analisi dei corpi P1* e P2 o il valore medio della resistenza post-picco per l'analisi del corpo C3; per l'Unità 3 si è derivato l'angolo di attrito operativo per F=1. I valori dei parametri adottati in queste analisi e derivanti dal citato §4.3 sono richiamati in Tabella 4.8.

Per ciascuna analisi LEM è stata valutata la variazione del fattore di sicurezza, ΔFS, rispetto al valore unitario delle analisi a ritroso, secondo l'espressione (7.2):

$$\Delta FS(\%) = \frac{FS_{dreno} - FS_{iniziale}}{FS_{iniziale}} \cdot 100 \qquad (7.2)$$

Tabella 7.1 Valori degli angoli di attrito assegnati alle unità 1, 2a e 2b e mobilizzati nell'unità 3 dall'equilibrio dei corpi analizzati lungo la sezione CC' in assenza di dreni;in nero i valori assegnati in base alle analisi di laboratorio ed in rosso gli angoli operativi derivati dalle analisi a ritroso.

Unità	corpo P1* (°)	corpo P2 (°)	corpo C3 (°)
1	22.3	x	22.3
2a	34	x	34
2b	18.7	18.7	26.4
3	16.5	16.4	27.9

Occorre ricordare che, per quei dreni la cui estensione supera il bordo destro del modello nella parte di monte, il regime delle pressioni interstiziali implementato nelle analisi LEM è quello risultato dell'analisi di filtrazione eseguita attivando dreni più corti nella parte di monte rispetto a quelli nel resto del pendio. Quindi, per lo scenario di calcolo relativo a dreni di lunghezza 200 m, in ogni analisi LEM si è implementata la distribuzione delle pressioni interstiziali ottenuta da analisi di filtrazione con tali dreni se collocati in posizioni dalla 1 alla 17. Analogamente, per lo scenario di calcolo con dreni di 300 m, le analisi LEM sono state condotte implementando l'assetto piezometrico dedotto con tali se collocati dalla posizione 1 alla posizione 14, ma non più a monte. Dalla posizione 18 alla 22 è stato possibile condurre solo analisi con dreni di 100 m.

*7.2.2.1 Analisi di stabilità del corpo P1**

I risultati delle analisi dell'equilibrio limite del corpo P1* sono illustrati nella Figura 7.9 in termini di variazione percentuale dell'incremento del fattore di sicurezza, $\Delta FS(\%)$, al variare della posizione del dreno, attivato singolarmente e caratterizzato da data lunghezza ed inclinazione. In particolare, in Figura 7.9a sono

confrontati i risultati delle analisi di stabilità al variare della lunghezza del dreno con inclinazione pari al 3%, mentre in Figura 7.9b si mostra la variazione del fattore di sicurezza $\Delta FS(\%)$ al variare della lunghezza del dreno con inclinazione dell'8%. Negli stessi diagrammi è riportata, per completezza, la posizione orientativa del contatto a piano campagna tra materiali in affioramento.

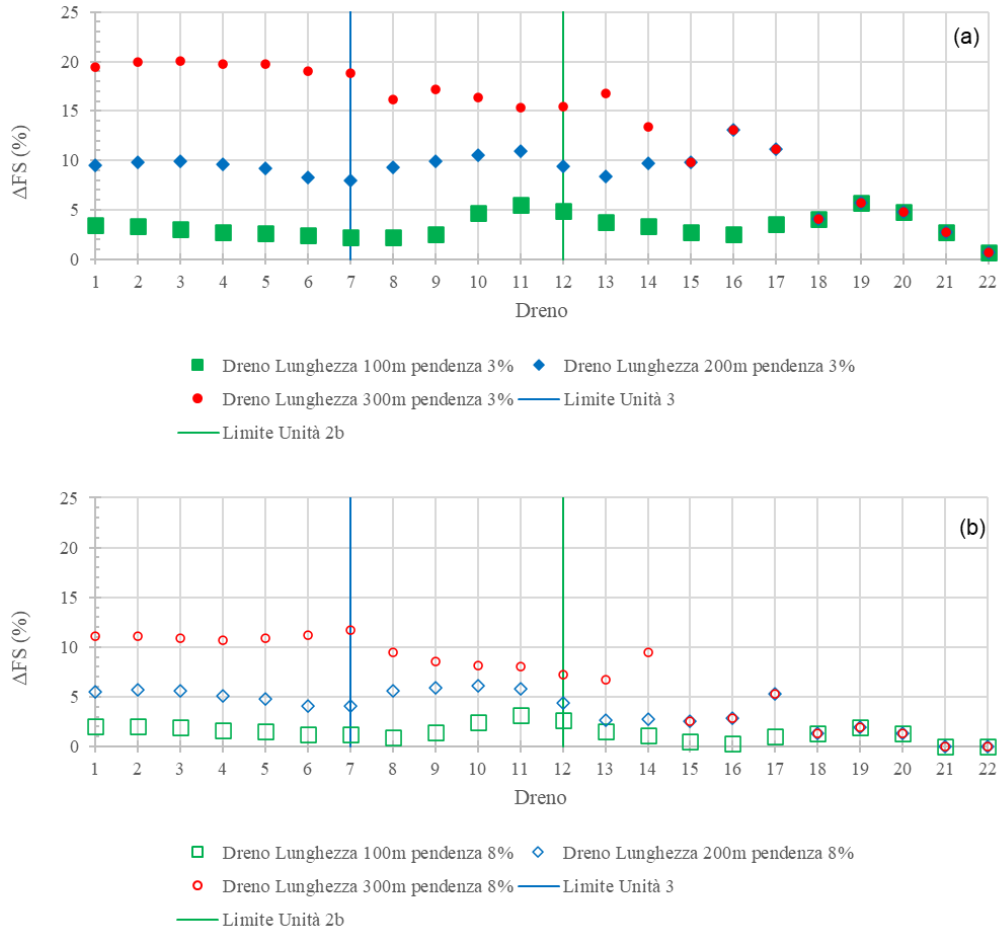


Figura 7.9 Intervento di drenaggio: diagrammi delle variazioni percentuali del fattore di sicurezza del corpo P1 al variare della posizione dei dreni sub-orizzontali: (a) dreni di inclinazione 3% e lunghezza variabile; (b) dreni con inclinazione 8% e lunghezza variabile*

Dall'analisi dei risultati per il corpo P1* si osserva che:

a. l'introduzione di un singolo dreno sub-orizzontale comporta un incremento del fattore di sicurezza che va da un minimo dell'1%, nel caso di dreno di 100 m con pendenza 8%, ed un massimo valore del 20%, nel caso di dreno di 300 m inclinato del 3%;
b. l'incremento del fattore di sicurezza è tanto maggiore quanto maggiore è la lunghezza del dreno (a parità di inclinazione) e quanto minore è la sua pendenza (a parità di lunghezza);
c. la posizione del dreno e, dunque, il materiale entro cui esso è installato, incide sull'incremento della stabilità del corpo P1*. Infatti, nel caso di dreno lungo 300 m, indipendentemente dall'inclinazione, il massimo incremento del fattore di sicurezza si ottiene se il dreno è installato nell'argilla dell'Unità 3. Se si considera il dreno di lunghezza 200 m, indipendentemente dall'inclinazione, il massimo effetto benefico si ha se il dreno è installato nella sub-Unità 2b a metà pendio (tra la posizione 9 e la posizione

11). Infine, se si adotta il dreno di lunghezza pari a 100 m, la massima variazione positiva del fattore di sicurezza si ottiene se il dreno è installato nella sub-Unità 2a (nella parte alta del pendio, es. posizione 19), o nella sub-Unità 2b (a metà pendio, es. posizione 11).

7.2.2.2 Analisi di stabilità del corpo in scarpata C3

I risultati delle analisi dell'equilibrio limite del corpo in scarpata C3 sono illustrati nella Figura 7.10 in termini di variazione dell'incremento del fattore di sicurezza $\Delta FS(\%)$ al variare della posizione del dreno, attivato singolarmente ed avente lunghezza variabile e pendenza pari al 3%. In questo caso, nelle analisi di stabilità è stato implementato l'assetto piezometrico ottenuto dalle analisi di filtrazione eseguite attivando il dreno nelle posizioni da 12 a 22, che sono quelle per cui il dreno riduce maggiormente i livelli piezometrici nella parte di monte del pendio.

Come descritto nel capitolo 4 (§4.2.1), nella simulazione del Meccanismo di tipo 2 il peso unitario da assegnare al sovraccarico distribuito, rappresentativo del peso del volume di terreno del corpo P1 gravante sul piede dei corpi in scarpata come il C3, è stato determinato mediante l'espressione 4.1, in cui le aree sono state determinate tenendo conto della effettiva posizione del pelo libero, variabile di volta in volta in funzione della posizione del dreno nell'analisi di filtrazione.

I risultati mostrano un incremento del fattore di sicurezza variabile tra 0.3%, se si attiva il dreno 22 nella parte alta, qualunque sia la sua lunghezza, e l'8%, se si attiva il dreno 14 di 300 m di lunghezza. Nel complesso, si può affermare che l'aumento della stabilità del corpo in scarpata C3 è limitato rispetto a quello ottenuto per il corpo P1*, il che suggerisce di integrare l'intervento di drenaggio con ulteriori strategie per la mitigazione dell'attività franosa in scarpata, come ad esempio adottando la riprofilatura della parte alta del pendio.

Va comunque sempre considerato che l'analisi di stabilità del corpo in scarpata del tipo C3, qui discussa, sottostima la sua stabilità, in quanto tale corpo interagisce con i corpi di valle, come il P1, di cui si assume l'attività nelle analisi (Figura 7.10). Però, nel momento in cui si intervenisse con un dreno capace di far aumentare il coefficiente di sicurezza dei corpi P1* o P1, ad esempio il dreno in posizione 12, la mitigazione dell'attività del corpo di valle comporterebbe un aumento aggiuntivo del coefficiente di stabilità del corpo C3, qui non contemplato (il corpo P1 eserciterebbe al piede del copro C3 un contenimento laterale qui non contemplato). I valori di $\Delta FS\%$ in Figura 7.10 sono quindi cautelativi per la maggior parte delle posizioni dei dreni esaminate.

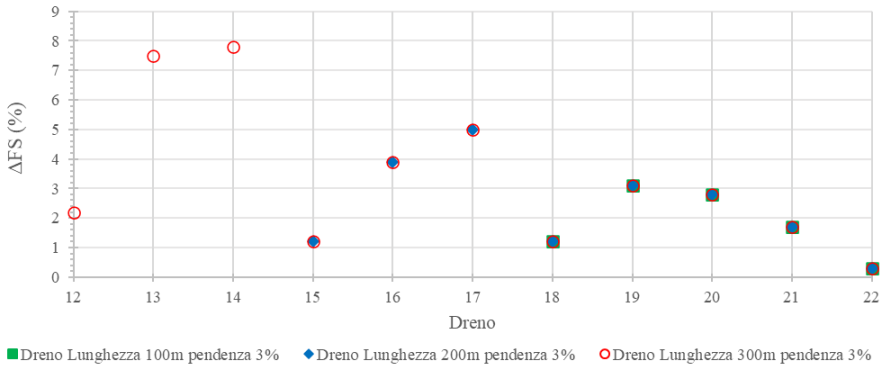


Figura 7.10 Intervento di drenaggio: diagrammi delle variazioni percentuali del fattore di sicurezza del corpo C3 al variare della posizione deli dreno sub-orizzontale di lunghezza variabile ed inclinazione 3%

7.3 Esempio di riprofilatura del pendio

Una possibile strategia di mitigazione dell'attività franosa consiste nella riprofilatura del pendio, che preveda uno scarico nella porzione di monte ed un carico nella porzione di valle (Hutchinson, 1988). In questo lavoro sono stati ipotizzati due possibili interventi di riprofilatura, che comportano una modifica del profilo del versante nella parte alta, interagente con l'edificato, e nella parte bassa, in prossimità del fosso oggi sede di erosione in sponda. Nel primo caso, nella riprofilatura proposta solo a titolo esemplificativo, lo scavo comporta l'abbattimento di parte dell'edificato coinvolto nel meccanismo franoso, posizionato tra le due scarpate SR1 e SR2. Nel secondo caso si è prevista la collocazione del materiale scavato a monte in prossimità del fosso al piede dei corpi P1, P2 e P1*. L'efficacia dell'intervento di riprofilatura è stata indagata con riferimento alla sezione CC' per i corpi P1*, P2 e C3. In aggiunta, poiché la parte alta della sezione 1AC intercetta la porzione della testa del versante ove è più ampia l'area di scarpata, tra le linee SR1 e SR2, e dove l'edificato coinvolto nel processo franoso è più esteso, si è ritenuto di valutare l'efficacia dell'intervento di riprofilatura per la stabilizzazione sia del corpo P1* sia del corpo C3 anche in tale sezione. Nel seguito i risultati delle analisi di stabilità sono illustrati ipotizzando dapprima l'esecuzione della sola riprofilatura della parte alta del pendio, successivamente operando la sola riprofilatura della parte di valle e, infine, tenendo conto della contestuale realizzazione dei due interventi. Per entrambe le ipotesi di riprofilatura, è stata implementata nel calcolo LEM la distribuzione delle pressioni interstiziali desunta dalle analisi di filtrazione stazionaria discusse nel capitolo 4, in assenza di dreni.

7.3.1 Riprofilatura della parte alta del pendio

Si è assunta la riprofilatura della parte alta del pendio di tipo scatolare, come mostrato in Figura 7.11. L'efficacia di tale intervento sulla stabilità dei corpi P1* e C3 è stata verificata con riferimento alle due sezioni 1AC e CC', ove la prima interseca il corpo di frana in scarpata nella zona di massima ampiezza dell'area tra le scarpate SR1 e SR2, mentre la seconda sezione lo interseca secondo la massima pendenza. Di fatto, l'alleggerimento della parte di testa dei corpi P1* e C3 lungo la sezione 1AC coinvolge non solo della stecca degli edifici che si affacciano direttamente su Via Martiri di via Fani, ma anche di quella che si affaccia su via Vitalia (Figura 7.11a). Lungo la sezione CC', invece, l'alleggerimento coinvolge la sola prima stecca di edifici (Figura 7.11b). Infatti, la quantità di terreno da asportare per metro lineare in direzione trasversale risulta

significativamente più grande lungo la sezione 1AC rispetto a quello lungo la sezione CC'; il volume da asportare è pari a circa 302 m^3/m nella sezione 1AC ed a 190 m^3/m nella sezione CC', con profondità di scavo di 6-7 m.

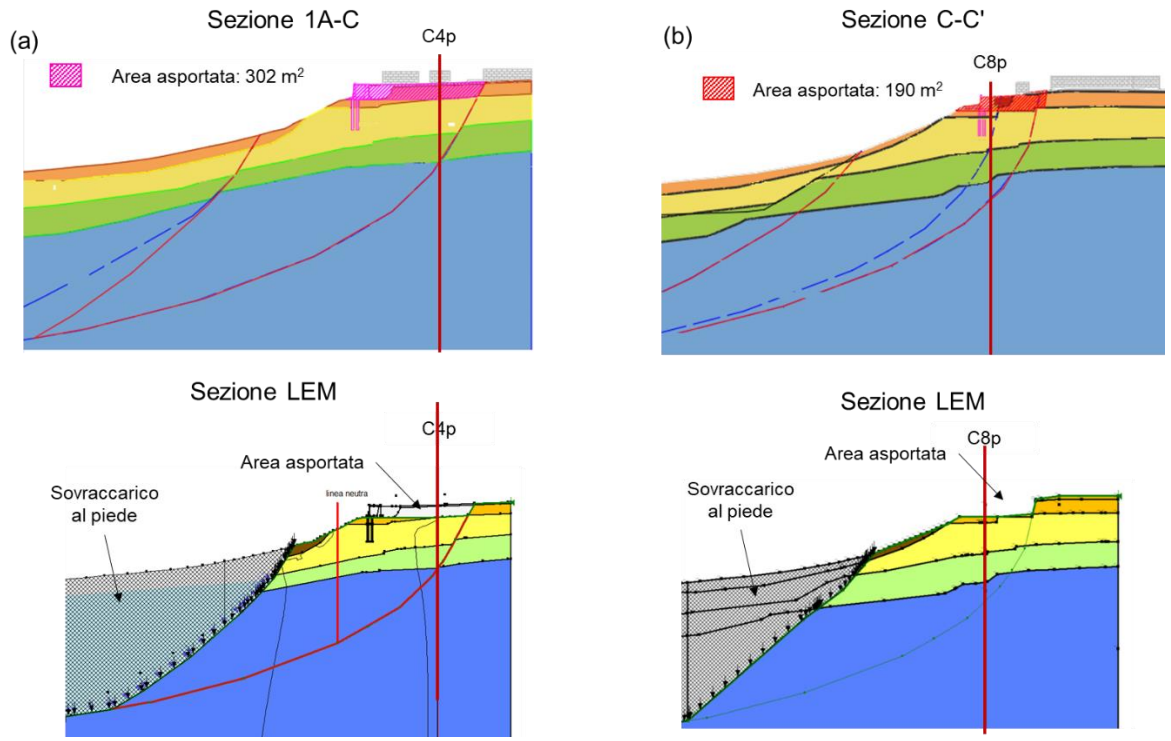


Figura 7.11 Intervento di riprofilatura della parte alta del versante lungo la sezione 1AC (a) e CC' (b)

Il profilo lungo ciascuna sezione è stato implementato nel modello FEM (Seep/w) per eseguire nuove analisi di filtrazione. Per la sezione CC′, già esaminata nel capitolo 4, l'analisi di filtrazione stazionaria è stata condotta con le medesime condizioni al contorno descritte per il modello con topografia originale nel capitolo 4 (§4.3.1). Per la sezione 1AC, invece, sono state eseguite due analisi di filtrazione, una in cui è stato implementato il profilo topografico attuale ed con la riprofilatura della parte alta del pendio (Figura 7.11°). Tali analisi sono state eseguite adottando un modello numerico discretizzato con elementi triangolari a 6 nodi, riportato in Figura 7.12, le cui condizioni al contorno idrauliche sono state assegnate tenendo conto dell'assetto idrogeologico tridimensionale del versante. Nello specifico, sulla superficie libera del versante è stata impostata la condizione di drenaggio libero, mentre alla base è stato assegnato un bordo impermeabile. In corrispondenza dell'intersezione in superficie della sezione con l'affluente del vallone del Fico, è stata impostata la condizione di pressione interstiziale nulla, mentre sui bordi verticali è stata assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni con pelo libero a 21 m dal p.c. lungo il bordo di monte, e con pelo libero a 5 m dal p.c. sul bordo di valle. Ciò equivale ad assegnare un carico idraulico di 195 m s.l.m. e di 105 m s.l.m., rispettivamente, sul bordo di monte e di valle del modello.

Le caratteristiche idrauliche assegnate ai materiali sono state le stesse della sezione CC' (Figura 4.7, *Tabella 4.4*).

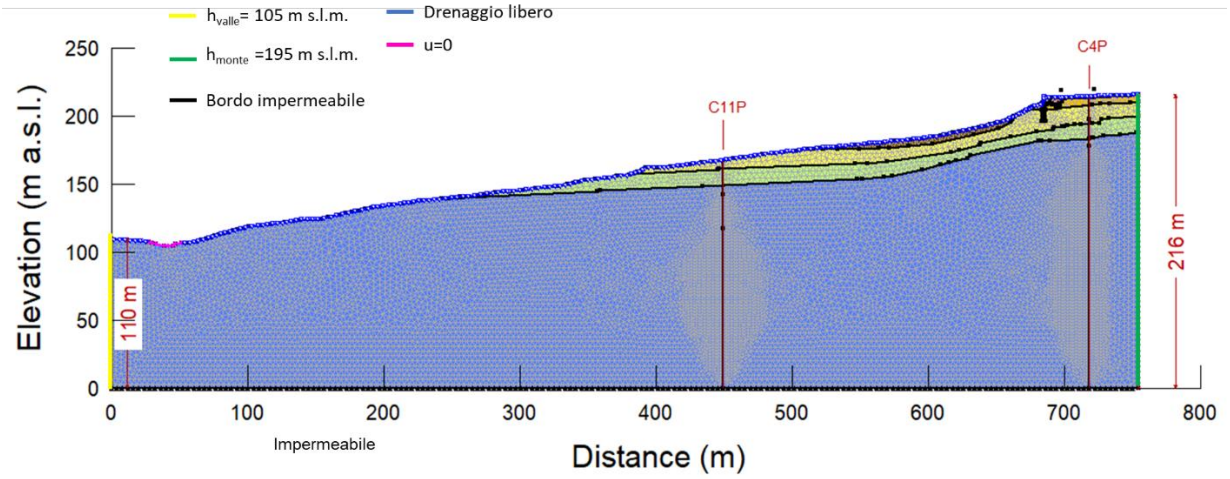


Figura 7.12 Mesh di calcolo e condizioni al contorno idrauliche applicate nel modello numerico FEM per le analisi di filtrazione stazionaria lungo la sezione 1AC

L'assetto piezometrico calcolato lungo la sezione 1AC è illustrato in termini di linee equipotenziali, distribuzione dei vettori di velocità di flusso e linee di flusso in Figura 7.13, mentre la Figura 7.14 mostra i profili delle pressioni interstiziali confrontati con i dati di monitoraggio lungo le verticali C4p e C11p.

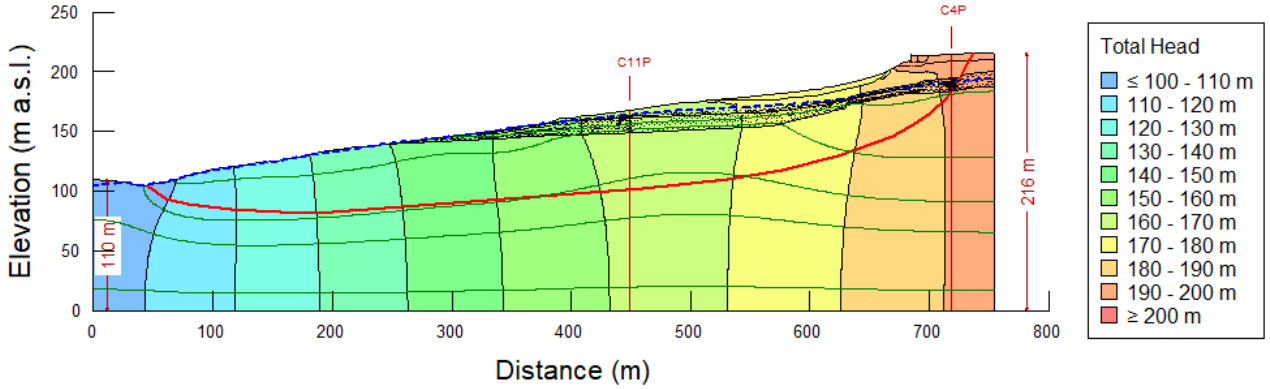


Figura 7.13 Risultati dell'analisi di filtrazione stazionaria in termini di linee equipotenziali, distribuzione dei vettori di velocità di flusso e linee di flusso nella sezione 1A-C

I risultati mostrano che nella sezione 1°-C i flussi sono di velocità massima nella sub-Unità 2b, mentre il pelo libero si attesta a circa 25 m di profondità da p.c. nella parte alta del versante, per poi avvicinarsi gradualmente al piano campagna e affiorare in corrispondenza della scarpata SR0. Il confronto tra i dati di sito e la previsione numerica sono indicativi di una leggera sovrastima delle pressioni interstiziali della simulazione numerica, di circa 13 kPa a 38.5 m lungo la verticale C4p e circa 25 kPa lungo la verticale C11p.

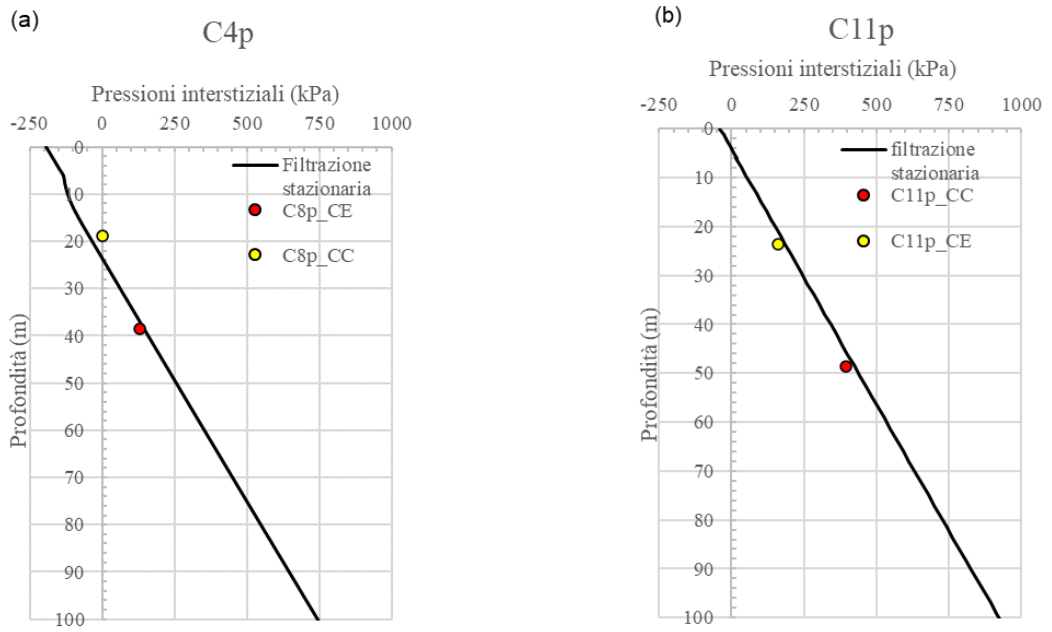


Figura 7.14 Confronto tra dati di monitoraggio piezometrico e profili delle pressioni interstiziali lungo le due verticali di indagine C4p e C11p risultanti dalla simulazione numerica della filtrazione

Analogamente a quanto fatto per la sezione CC', una volta determinato il regime di filtrazione stazionaria nel pendio, questo è stato implementato nelle analisi a ritroso dell'equilibrio limite dei corpi P1* e C3 intercettati dalla sezione 1AC. Poiché lungo tale sezione la scarpata SR2 interagisce in maniera significativa con l'edificato, le analisi a ritroso LEM sono state eseguite considerando la presenza degli edifici in cresta, simulata attraverso l'applicazione di un carico all'estradosso del pendio nella porzione di monte, di intensità pari a 50 kPa, distribuito su un tratto di larghezza 50 m che si estende verso monte a partire da 15 m di distanza a monte dal paramento esterno del muro di sostegno (stessa procedura descritta nel §9.2.4 della I Relazione di II Fase). In Tabella 7.2 è riportata, per la sezione 1°-C, una sintesi dei parametri di resistenza assegnati ai diversi strati nelle analisi a ritroso LEM, mentre in rosso sono riportati i valori dell'angolo di attrito mobilizzato per l'Unità 3 dall'equilibrio dei corpi considerati. Per tutte le analisi a ritroso dei corpi confinati da superfici di scivolamento che si sviluppano anche negli strati superficiali dell'unità 1 e della sub-Unità 2a, ossia il corpo profondo P1* e il corpo in scarpata C3, i valori dell'angolo di attrito assegnati alle unità litologiche si riferiscono ai valori medi delle resistenze ultime, desunti dalle prove di laboratorio descritte nel capitolo 7 della I Relazione di II fase e richiamate nel capitolo 2 della presente relazione. Il parametro di resistenza assegnato alla sub-Unità 2b è stato invece assunto pari all'estremo superiore dell'intervallo di variazione dell'angolo di resistenza determinato da prove di taglio diretto ciclico (capitolo 7 della I Relazione di II fase e capitolo 3 della presente). Per l'equilibrio limite del corpo C3, che interessa tutte e quattro le unità litologiche, l'angolo di attrito assegnato alla sub-Unità 2b è rappresentato dal valore medio della resistenza post-picco, volendo ritenere tale corpo meno antico di quelli a valle, tale per cui gli spostamenti non hanno necessariamente mobilizzato le resistenze residue nella banda di taglio. Nella porzione sopra falda della superficie di scivolamento, la resistenza a taglio è stata valutata secondo l'espressione 7.1.

L'angolo di attrito mobilizzato dall'equilibrio del corpo P1* risulta prossimo alla resistenza residua dell'Unità 3. Il corpo C3 risulta essere maggiormente instabile rispetto al corpo P1*, mobilizzando resistenze maggiori, comprese tra il valore medio di picco e post- picco dell'Unità 3. Tuttavia, le resistenze mobilizzate lungo la sezione 1°-C risultano inferiori a quelle mobilizzate nella sezione CC′, poiché la sezione 1AC non è quella di massima pendenza.

Tabella 7.2 Resistenze mobilizzate nell'Unità 3 lungo la sezione 1A-C

Unità	corpo P1* (°)	corpo C3 (°)
1	22.3	22.3
2a	34	34
2b	18.7	26.4
3	15.1	25.7

I parametri di resistenza determinati mediante la back-analysis di dettaglio (Tabella 7.2 per la sezione 1AC e *Tabella 4.8* per la sezione CC′) sono stati successivamente implementati in analisi dell'equilibrio limite dei corpi P1*, P2 e C3 riprofilati dello scavo alla testa del pendio.

In particolare, per la sezione 1AC, le analisi LEM sono state eseguite dapprima implementando l'alleggerimento dovuto al solo abbattimento degli edifici, e successivamente implementando la riprofilatura in Figura 7.11a. L'abbattimento degli edifici in cresta, simulato rimuovendo il loro peso (posto equivalente alla distribuzione di una pressione come dianzi deto), produce un incremento del fattore di sicurezza dell'1% per il corpo P1* e dell'1.5% per il corpo C3. Il rimodellamento della parte alta del versante, che include anche l'asportazione di terreno, comporta un incremento del fattore di sicurezza complessivamente del 3.8% e del 4.7%, rispettivamente per il corpo P1* e C3 (Tabella 7.3).

Con riferimento alla stabilità dei corpi P1* e C3 intercettati dalla sezione CC', che non interagisce direttamente con l'edificato, è stata valutata l'efficacia del solo intervento di riprofilatura del pendio, con analisi LEM che mostrano che questa incide, per la sezione CC', meno rispetto a quanto incide nella sezione 1AC. Infatti, l'incremento del fattore di sicurezza è di circa 1.8% per il corpo P1*, mentre risulta del 2.9% per il corpo C3.

Tabella 7.3 Incremento del fattore di sicurezza ΔFS (%) dei corpi analizzati in seguito ad intervento di scarico in cresta

	Abbattimento edifici in testa		Riprofilatura	
	P1*	C3	P1*	C3
Sezione 1AC	1	1.5	3.8	4.7
Sezione CC'	---	---	1.8	2.9

7.3.2 Riprofilatura della parte bassa del pendio

Nell'ipotesi di intervenire sulla geometria del pendio nella zona di valle, per la stabilizzazione dei corpi profondi P1* e P2, sono state individuate due possibili geometrie del versante (Figura 7.15): il profilo 1 prevede un rilevato di circa 678 m^3/m, collocato a valle come mostrato in Figura 7.15a, mentre, nel caso del profilo 2, il volume del rilevato i è di circa 1100 m^3 per metro lineare (Figura 7.15b).

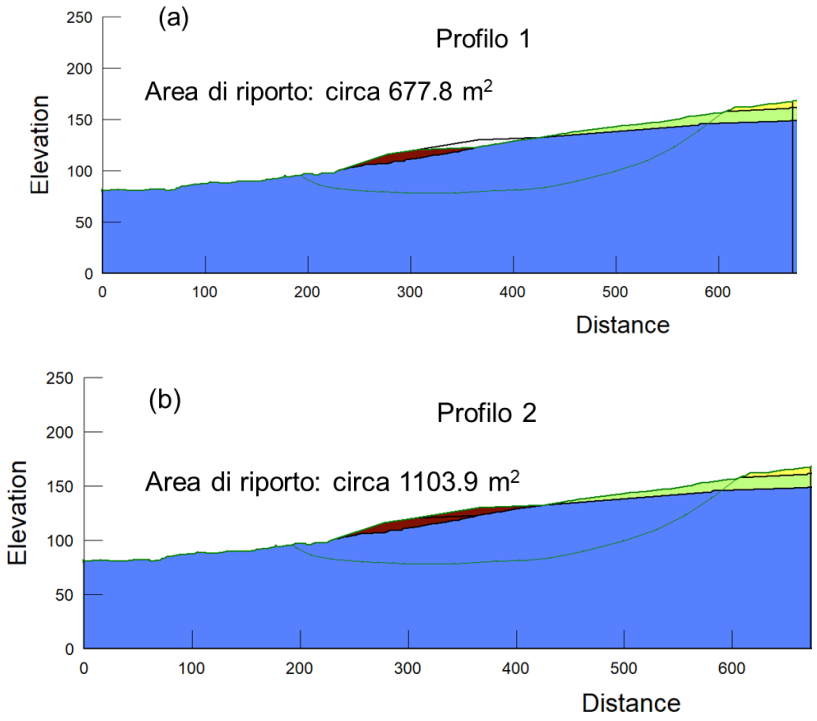


Figura 7.15 Intervento di riprofilatura della parte bassa del versante: geometria del profilo 1 (a) e del profilo 2 (b)

Per ciascuna geometria, è stato indagato l'equilibrio limite dei corpi P1* e P2 intercettati dalla sezione CC′, valutandone i fattori di sicurezza FS ed il loro incremento rispetto alla condizione iniziale. I parametri di resistenza al taglio assegnati a ciascuno strato sono quelli definiti sulla base della back-analysis di dettaglio descritta nel capitolo 4 della presente relazione (Tabella 7.1).

L'incremento del fattore di sicurezza risulta essere molto più significativo per il corpo P2 rispetto al corpo P1*, a parità di geometria del rilevato (Tabella 7.4). In particolare, il ΔFS% del corpo P1* è pari a 4.7% considerando il profilo 1 (Figura 7.15a) ed a 7% nel caso del profilo 2 (Figura 7.15b), mentre il ΔFS% del corpo P2 è del 13.7% nel caso del profilo 1 (Figura 7.15a) e del 20% nell'ipotesi di riprofilatura secondo la geometria 2 (Figura 7.15b).

Tabella 7.4 Incremento del fattore di sicurezza ΔFS (%) dei corpi P1 e P2 analizzati lungo la sezione CC' in seguito ad intervento di carico al piede*

Profilo 1		Profilo 2	
P1*	P2	P1*	P2
4.7	13.7	7	20

7.3.3 Contestuale riprofilatura della parte alta e bassa del pendio

Allo scopo di valutare il complessivo incremento della stabilità del corpo P1* dovuto ad un sostanziale intervento di riprofilatura del pendio, che combina la riprofilatura alla testa e al piede del corpo, è stata eseguita un'ulteriore analisi LEM, implementando le geometrie illustrate nelle Figura 7.11b e Figura 7.15a (rilevato al

piede più realisticamente adottabile in ragione dei minori volumi di terra movimentati). Tale riprofilatura complessiva produce un incremento di FS del corpo P1* del 6.7% (Figura 7.16).

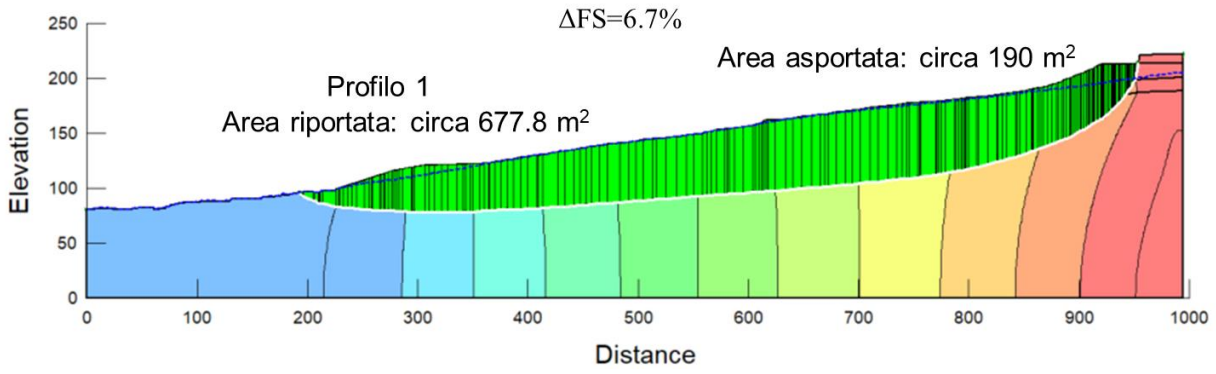


Figura 7.16 Intervento di riprofilatura del versante: scarico a monte e carico valle per equilibrio del corpo P1 lungo la sezione CC'*

7.4 Combinazione degli interventi di drenaggio e riprofilatura del pendio

L'adozione di diversi interventi di stabilizzazione può, nel complesso, incrementare significativamente la stabilità dei diversi corpi di frana esaminati. Allo scopo di valutare tale incremento, sono state eseguite delle analisi LEM che contemplano la contemporanea attivazione di più dreni sub-orizzontali e la realizzazione della riprofilatura del pendio. Nello specifico, si è ipotizzato di attivare tre dreni di inclinazione pari al 3%: due di lunghezza 100 m nelle posizioni 1 e 11, ed uno di lunghezza 300 m in posizione 14 (Figura 7.3), che interessano, rispettivamente, l'Unità 3, la sub-Unità 2b e la sub-Unità 2a. La scelta dei dreni è stata basata dei diagrammi di incremento del fattore di sicurezza al variare della posizione del dreno, mostrati in Figura 7.9 per il corpo profondo P1* e nella Figura 7.10 per il corpo in scarpata C3. In particolare, i dreni 1 e 11 sono quelli che, inseriti nelle Unità 3 e sub-Unità 2b, massimizzano il fattore di sicurezza del corpo P1*; il dreno 14 è quello che incrementa maggiormente la stabilità del corpo C3. In Figura 7.17 è riportato l'assetto piezometrico in presenza contemporaneamente dei dreni 1 e 11 di lunghezza 100 m e del dreno 14 di lunghezza 300 m. I risultati mostrano un significativo abbassamento del pelo libero nella parte alta del pendio, ed una contestuale riduzione dei livelli piezometrici e della componente verticale del moto di filtrazione (come evidenziato dalla curvatura delle linee equipotenziali) nella porzione al di sotto del paese.

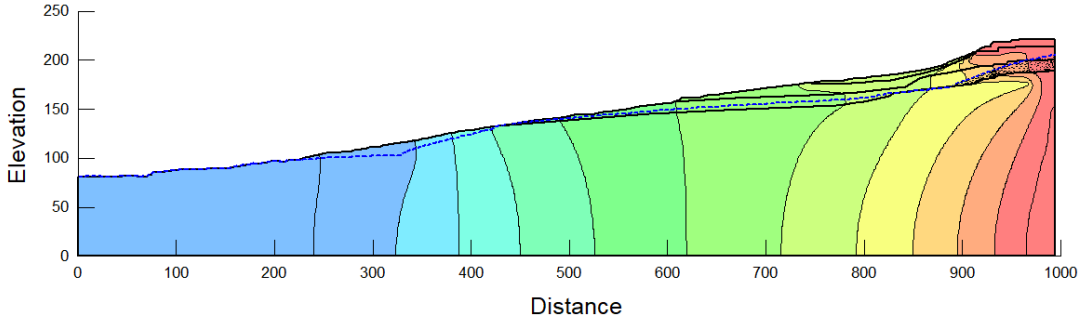


Figura 7.17 Intervento di drenaggio profondo: risposta idraulica del pendio lungo la sezione CC' nel caso di attivazione contemporanea dei dreni 1, 11 e 14 rispettivamente nello strato dell'unità 3, 2b e 2a.

L'assetto piezometrico così determinato è stato implementato nelle analisi LEM dei corpi P1*, P2 e C3, per valutare l'incremento del fattore di sicurezza rispetto alla condizione iniziale in assenza di dreni. I risultati delle analisi LEM, sintetizzati in Tabella 7.5, indicano un sostanziale incremento della stabilità dei corpi, più significativo per i corpi profondi P1* e P2 e meno importante per il corpo C3.

La combinazione dell'intervento di drenaggio (Figura 7.17) con la riprofilatura del pendio, quest'ultima eseguita scaricando la zona di monte di un volume di 190m^3/m e caricando la zona di valle con un rilevato di volume 678 m^3/m (Figura 7.18), produce un ulteriore incremento del fattore di sicurezza (Tabella 7.5). La stabilità del corpo P1* risulta, infatti, incrementata di circa 28% rispetto alla condizione iniziale; il fattore di sicurezza del corpo P2 aumenta di quasi il 30%, ed anche il corpo C3 risulta più stabile, raggiungendo un fattore di sicurezza pari a 1.11 (con un incremento del 10.8% rispetto alla condizione iniziale).

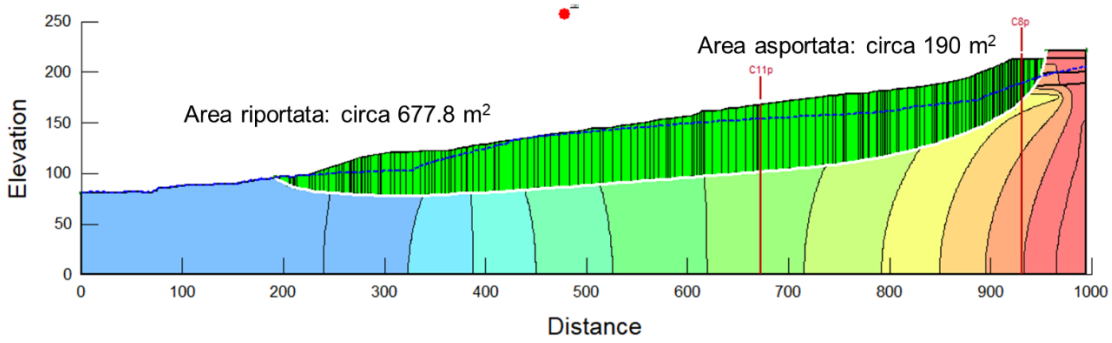


Figura 7.18 Combinazione degli interventi di drenaggio profondo e di riprofilatura del pendio : risposta idraulica del pendio lungo la sezione CC' nel caso di attivazione contemporanea dei dreni 1, 11 e 14 rispettivamente nello strato dell'unità 3, 2b e 2a.

Come discusso dianzi, bisogna tuttavia considerare che il meccanismo di frana del corpo in scarpata C3 è fortemente influenzato dal movimento del corpo profondo P1. Pertanto, un intervento mirato alla stabilizzazione dei corpi profondi P1 e P2 implica necessariamente un incremento della stabilità del corpo in scarpata C3 per spinta passiva al piede, qui non preso in considerazione. Gli incrementi di FS citati per il corpo C3 sono, quindi, ancora cautelativi.

Tabella 7.5 Incremento dei fattori di sicurezza ΔFS (%) dei corpi P1, P2 e C3 intercettati dalla sezione CC' in seguito alla combinazione di diverse strategie di intervento*

	CORPO P1* **%**	**CORPO P2** **%**	**CORPO C3** **%**
Attivazione contemporanea di 3 dreni	19.5	16.1	7.6
Attivazione contemporanea di 3 dreni e riprofilatura del pendio	27.6	29.9	10.8

Per completezza, nella, Figura 7.19, Figura 7.20 e Figura 7.21 viene mostrata una sintesi dei risultati delle analisi LEM per la valutazione dell'efficacia degli interventi di mitigazione della suscettibilità da frana

mostrati in questo lavoro a titolo esemplificativo-metodologico. I risultati sono illustrati in termini di fattore di sicurezza e suo incremento ΔFS(%) per i diversi corpi analizzati e per ciascuna strategia di intervento. Nelle stesse figure sono riportati anche i parametri di resistenza a taglio assegnati ai materiali costituenti le unità, definiti sulla base delle back-analysis di "dettaglio". Nella Figura 7.19 sono sintetizzati i risultati delle analisi condotte ipotizzando la realizzazione di un sistema di dreni sub-orizzontali profondi; nella Figura 7.20 sono sintetizzati i risultati relativi alla realizzazione dell'intervento di riprofilatura del pendio; infine, nella Figura 7.21 sono illustrati i risultati relativi ad un intervento massivo che contempli sia la realizzazione del sistema di drenaggio profondo sia la riprofilatura del pendio.

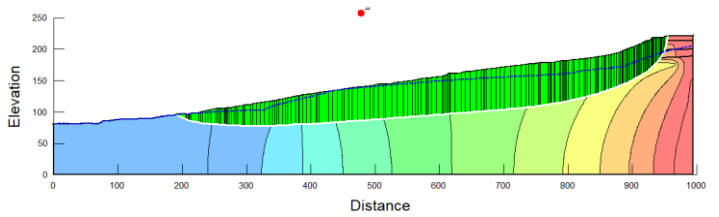
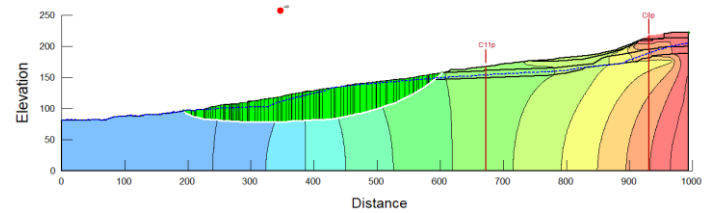
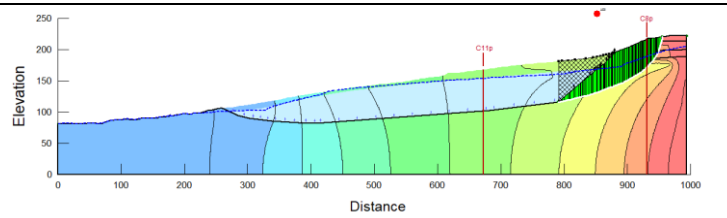
				Intervento di drenaggio profondo				
		Back-analysis		Attivazione di 2 dreni (11+19)		Attivazione di 3 dreni (1+11+14)		Analisi H+LEM con intervernto di drenaggio profondo
Sezione C-C'	P1*	Unità	φ′	FS	ΔFS	FS	ΔFS	
		1	22.3	1.105	10.1	1.2	19.5	
		2a	34					
		2b	18.7					
		3	16.5					
		FS	1.004					
	P2	Unità	φ′	FS	ΔFS	FS	ΔFS	
		1	22.3	1.058	5.5	1.164	16.1	
		2a	34					
		2b	18.7					
		3	16.4					
		FS	1.003					
	C3	Unità	φ′	FS	ΔFS	FS	ΔFS	
		1	22.3	1.027	2.7	1.076	7.6	
		2a	34					
		2b	26.4					
		3	27.9					
		FS	1					

Figura 7.19 Tabella di sintesi dell'efficacia dell'intervento di drenaggio profondo sull'equilibrio dei corpi P1 e P2 e del cuneo C3*

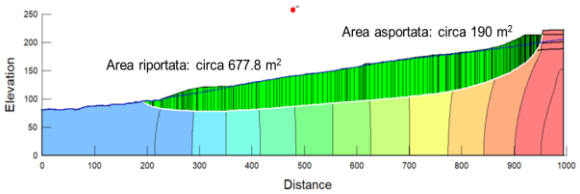
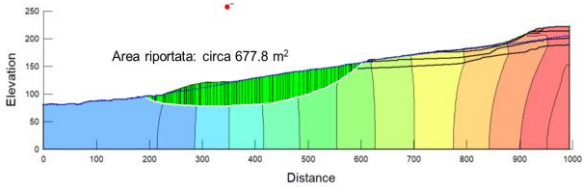
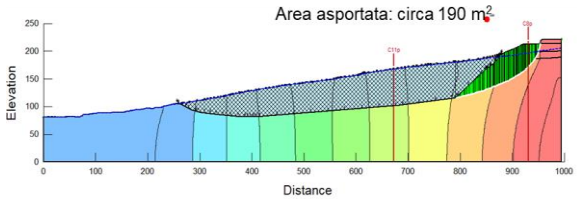
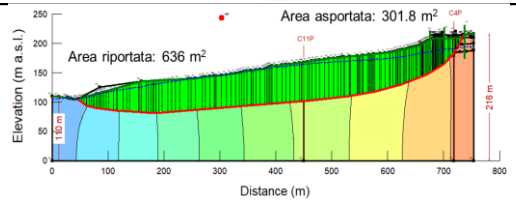
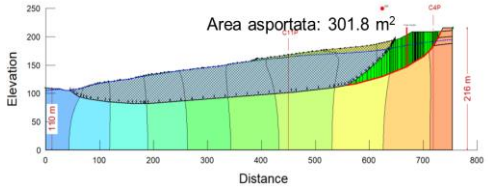
		Intervento di riprofilatura del pendio								
		Back-analysis		Scarico a monte		Carico a valle		Scarico a monte + Carico a valle		Analisi H+LEM con intervento di riprofilatura
Sezione C-C'	P1*	Unità	φ′	FS	ΔFS	FS	ΔFS	FS	ΔFS	
		1	22.3	1.022	1.8	1.051	4.7	1.071	6.7	
		2a	34							
		2b	18.7							
		3	16.5							
		FS	1.004							
	P2	Unità	φ′	FS	ΔFS	FS	ΔFS	FS	ΔFS	
		1	22.3	x	x	1.14	13.7	x	x	
		2a	34							
		2b	18.7							
		3	16.4							
		FS	1.003							
	C3	Unità	φ′	FS	ΔFS	FS	ΔFS	FS	ΔFS	
		1	22.3	1.029	2.9	x	x	x	x	
		2a	34							
		2b	26.4							
		3	27.9							
		FS	1							
Sezione 1A-C	P1*	Unità	φ′	FS	ΔFS	FS	ΔFS	FS	ΔFS	
		1	22.3	1.043	3.8	1.054	4.9	1.096	9.1	
		2a	34							
		2b	18.7							
		3	15.1							
		FS	1.005							
	C3	Unità	φ′	FS	ΔFS	FS	ΔFS	FS	ΔFS	
		1	22.3	1.046	4.7	x	x	x	x	
		2a	34							
		2b	26.4							
		3	25.7							
		FS	0.999							

Figura 7.20 Tabella di sintesi dell'efficacia dell'intervento di riprofilatura del pendio sull'equilibrio dei corpi P1 e P2 e del cuneo C3*

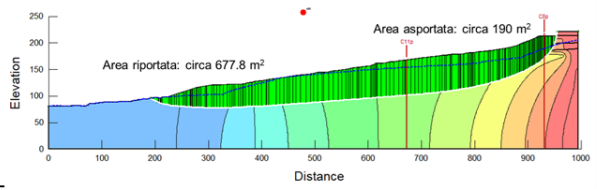
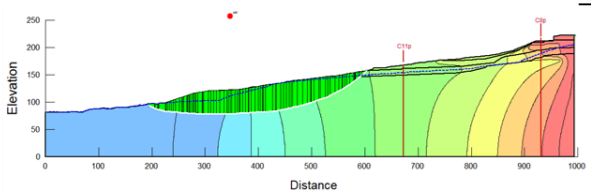
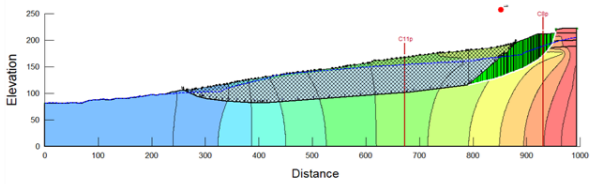
		Back-analysis		Combinazione degli interventi di mitigazione: Attivazione di 3 dreni (1+11+14) + riprofilatura		Combinazione degli interventi di mitigazione: Analisi H+LEM con combinazione degli interventi
Sezione C-C'	P1*	Unità	φ′	FS	ΔFS	
		1	22.3	1.281	27.6	
		2a	34			
		2b	18.7			
		3	16.5			
		FS	1.004			
	P2	Unità	φ′	FS	ΔFS	
		1	22.3	1.303	29.9	
		2a	34			
		2b	18.7			
		3	16.4			
		FS	1.003			
	C3	Unità	φ′	FS	ΔFS	
		1	22.3	1.108	10.8	
		2a	34			
		2b	26.4			
		3	27.9			
		FS	1			

Figura 7.21 Tabella di sintesi dell'efficacia della combinazione degli interventi di drenaggio profondo e riprofilatura del pendio sull'equilibrio dei corpi P1 e P2 e del cuneo C3*

Bibliografia

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapo-transpiration (guidelines for computing crop water requirements). In FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome, Italy.

Balzano, B., Tarantino, A., Nicotera, M.V., Forte, G., de Falco, M., Santo, A. (2019). "Building physically based models for assessing rainfall-induced shallow landslide hazard at catchment scale: case study of the Sorrento Peninsula (Italy)". Can Geotech J. 56(9):1291–1303. https://doi.org/10.1139/cgj-2017-6860611

Bentley (2022). Plaxis 2D Manual.

Cafaro, F., Cotecchia, F. (2015). *Influence of the mechanical properties of consolidated clays on their water retention curve.* Italian Geotechnical Journal, 49, 11–27.

Cascini, L., Bonnard, C., Corominas, J., Jibson, R., and Montero-Olarte, J. (2005). *Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development*. In Landslide Risk Management. pp. 209–246.

Cascini, L. (2008). *Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales*. Engineering Geology, 102(3–4): 164–177.

Cotecchia, F., Lenti, V., Bottiglieri, O., & Cafaro, F. (2004). *Analysis of a delayed re-activation of movements on a stiff clay slope in Southern Italy after foot excavation*. 11th International Symposium on Landslides, 1207–1214.

Cotecchia, F.., Ferlisi, S.., Santaloia, F.., Vitone, C.., Lollino, P.., Pedone, G.., and Bottiglieri, O. (2014). *La diagnosi del meccanismo di frana nell'analisi del rischio.* In XXV Convegno nazionale di Geotecnica, La Geotecnica nella difesa del Territorio e delle Infrastrutture dalle Calamità Naturali. Baveno. pp. 167–186.

Cotecchia, F., Santaloia, F., Lollino, P., Vitone, C., Pedone, G., and Bottiglieri, O. (2016). *From a phenomenological to a geomechanical approach to landslide hazard analysis*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 20(9): 1004–1031.

Cotecchia, F., Tagarelli, V., Pedone, G., Ruggieri, G., Guglielmi, S., and Santaloia, F. (2019). *Analysis of climate-driven processes in clayey slopes for early warning system design*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, 172(6): 465–480.

Cruden, D. M., Varnes, D. J. (1996). *Landslide types and processes*. Special Report - National Research Council, Transportation Research Board, 247, Washington, DC, 36–75

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., and Savage, W.Z. (2008). *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*. Engineering Geology, 102(3–4): 85–98.

Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.

Geo-Slope International (2004). GeoStudio, User's guide.

Glastonbury J. & Fell (2008). *Geotechnical characteristics of large slow, very slow, and extremely slow landslides*. Canadian Geotechnical Journal, 45(7),984-1005.

Grimaldi G. (2008). *Modelling the displacements of slow-moving landslides*. Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Salerno.

Guglielmi S. (2014). Environmental engineering operations for mitigation of landsliding. Tesi di laurea. Politecnico

di Bari.

Hutchinson, J.N. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In Proceedings of the 5th International Conference on Landslides, Lausanne, Switzerland, 10–15 July 1988; Volume 1, pp. 3–35.

Linee Guida AGI-ISPRA (2022) - Progettazione degli Interventi per la Mitigazione del Rischio da Frana, Edizioni AGI

Lupini, J.F., Skinner, A.E., Vaughan, P.R. (1981). *The drained residual strength of cohesive soils.* Geotechnique 31, 181–213.

Mualem, Y. (1976). *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. Water Resour Res 12, 513–522.

Nyambayo, V.P., and Potts D.M. (2010). Numerical simulation of evapotranspiration using a root water uptake model. Computers and Geotechnics, 37(1-2): 175-186.

Potts DM, Zdravković L. (1999). Finite Element Analysis In Geotechnical Engineering Theory. London: Thomas Telford

PPV Consulting (2020). Valutazione del danno, mediante ispezioni visive, di alcuni edifici dell'abitato di Chieuti (FG) - Relazione Finale.

van Genuchten, M.Th. (1980). *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*. Journal of the Soil Science Society of America 44, 892–898.

Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E., Clifton A W (1996). *Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction*. Canadian Geotechnical Journal 33, 379–392.

Zienkiewicz O.C. and Taylor R. L. (1989) The Finite Element Method. McGraw-Hill, New York