

COMMITTENTE:



DIREZIONE LAVORI:



APPALTATORE:
CONSORZIO:



SOCI:



PROGETTAZIONE:
MANDATARIA:



MANDANTI:



PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE

**ITINERARIO NAPOLI - BARI
RADDOPPIO TRATTA APICE - ORSARA
I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA**

GEOTECNICA
TRATTE ALL'APERTO
VARIANTE 28 - Opere di mitigazione dei movimenti franosi - Tratta all'aperto Castel del Fiego - da pk 9+550 a pk 10+090 -
Relazione Geotecnica Generale

APPALTATORE	DIRETTORE DELLA PROGETTAZIONE	PROGETTISTA
Consorzio HIRPINIA AV Il Direttore Tecnico Ing. Aristodemo Busillo 15/02/2023	Il Responsabile integrazione fra le varie prestazioni specialistiche Ing. G. Cassani	Ing. G. Cassani

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.	SCALA:
IF28	01	V	ZZ	RH	OC0101	281	A	-

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione per consegna	Rocksoil	15/02/2023	A. Zimbaldi	15/02/2023	M. Gatti	15/02/2023	Ing. G. Cassani
								15/02/2023

APPALTATORE: Conorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A.	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
PROGETTAZIONE: Mandatara Mandanti ROCKSOIL S.P.A. NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 2 di 35

Indice

1	PREMESSA	3
2	REVISIONE DEL MODELLO GEOTECNICO DEL VERSANTE	4
2.1	INDICAZIONI GEOMECCANICHE FORNITE DALLE INDAGINI P.E.D.....	5
2.1.1	INDICAZIONI STRATIGRAFICHE DALLE VERTICALI DI SONDAGGIO.....	5
2.1.2	INDICAZIONI STRATIGRAFICHE E GEOTECNICHE FORNITE DALLE PROVE DM.....	7
2.2	PROPRIETA' GEOTECNICHE DEI TERRENI	9
2.2.1	CARATTERISTICHE FISICHE E PARAMETRI DI STATO.....	9
2.2.2	CARATTERISTICHE DI RESISTENZA IN TENSIONI EFFICACI	12
2.2.3	PERMEABILITÀ.....	17
2.3	MISURE INCLINOMETRICHE	18
2.3.1	I PRIMI DATI INCLINOMETRICI: 2020-2021.....	18
2.3.2	STRUMENTAZIONE DI PED: 2021-2022	21
2.4	VALUTAZIONI IDRAULICHE E PIEZOMETRICHE	25
2.4.1	PERMEABILITÀ DA PROVE IN FORO	25
2.4.2	DATI DI MONITORAGGIO PIEZOMETRICO	26
2.5	CONFRONTO CON I RISULTATI DELLE INDAGINI GEOFISICHE	28
2.6	IPOSTESI SULLA CINEMATICA DEI MOVIMENTI DI VERSANTE	29
2.6.1	INFLUENZA DELLA PLUVIOMETRIA SULLO SVILUPPO DEI MOVIMENTI INCLINOMETRICI.....	29
2.6.2	MODELLO GEOMETRICO ED IDRAULICO DEL CORPO DI FRANA	31
2.6.3	ANALISI DI SENSITIVITÀ.....	33

APPALTATORE: <u>Consorzio</u> <u>Soci</u> HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A.	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA																	
PROGETTAZIONE: <u>Mandatario</u> <u>Mandanti</u> ROCKSOIL S.P.A. NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">COMMESSA</td> <td style="width: 10%;">LOTTO</td> <td style="width: 15%;">CODIFICA</td> <td style="width: 20%;">DOCUMENTO</td> <td style="width: 10%;">REV.</td> <td style="width: 15%;">FOGLIO</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">IF28</td> <td style="text-align: center;">01</td> <td style="text-align: center;">V ZZ RH</td> <td style="text-align: center;">OC0101 281</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">3 di 35</td> </tr> </table>						COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IF28	01	V ZZ RH	OC0101 281	A	3 di 35
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO													
IF28	01	V ZZ RH	OC0101 281	A	3 di 35													
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE																		

1 PREMESSA

Il presente documento è parte integrante del progetto definitivo della galleria Melito, inclusa nel raddoppio ferroviario della tratta compresa tra Apice ed Orsara, sulla linea Caserta – Foggia, itinerario Napoli – Bari.

La galleria Melito risulta ubicata fra le progressive km 5+063.50 (inizio imbocco lato Bari) e km 9+573.00 (imbocco lato Napoli) per una lunghezza totale di 4509.50 m, con una lunghezza coperta pari a 4479.50. Il tratto in naturale è compreso fra le progressive km 5+096.50 e km 9+510.00 ed è caratterizzato da una lunghezza di 4413.50 m.

Nella presente relazione si presenta il modello geotecnico revisionato in sede di Variante sulla base delle indagini integrative, così come descritto nella relazione “GEOLOGIA - STUDIO GEOLOGICO - GENERALE - VARIANTE 28 - Opere di mitigazione dei movimenti franosi - Tratta all’aperto Castel del Fiego - da pk 9+550 a pk 10+090 - Relazione geologica, geomorfologica generale” IF2801VZZRGGE0101281.

Le valutazioni contenute nel presente documento sono state prodotte con la consulenza della Società “GES – Geotechnical Engineering Services”, nata come Spin-off dell’Università Politecnica delle Marche, la quale, avvalendosi del parere scientifico del Prof. Giuseppe Scarpelli, ha esaminato i risultati delle campagne integrative di indagine e monitoraggio, predisponendo le valutazioni geotecniche, riportate in Allegato (Allegato 1 - Relazione di Consulenza GES – Geotechnical Engineering Services), per la definizione dei possibili movimenti di versante e per la definizione del modello geotecnico conseguente.

APPALTATORE: <u>Consorzio</u> <u>Soci</u> HIRPINIA AV SALINI IMPREGIO S.P.A. ASTALDI S.P.A.	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: <u>Mandatario</u> <u>Mandanti</u> ROCKSOIL S.P.A. NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.						
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 4 di 35

2 REVISIONE DEL MODELLO GEOTECNICO DEL VERSANTE

Le indagini integrative di PED hanno evidenziato la presenza di dissesti attivi e profondi lungo il versante ove ricade l'imbocco lato Napoli della Galleria Melito.

I caratteri cinematici dei dissesti emergono dalle osservazioni inclinometriche e dai profili sismici che sono risultati fra loro congruenti. L'approfondimento di indagine con ulteriori carotaggi, prove in sito e di laboratorio e monitoraggi, ha permesso un significativo miglioramento del quadro di conoscenza su proprietà geotecniche dei terreni e caratteristiche idrauliche del sottosuolo.

A seguito delle nuove conoscenze acquisite, viene nel seguito elaborata una revisione del modello geotecnico del versante, da assumere come riferimento per l'analisi dei cinematismi e per la definizione delle opere di stabilizzazione.

Il nuovo modello geotecnico di riferimento si basa su una diversa articolazione del modello stratigrafico rispetto a quella iniziale, per la necessità di accorpate i depositi interessati dai cinematismi sulla base del comportamento meccanico ed idraulico piuttosto che dell'origine e classificazione geologica dei singoli depositi. A tal fine si è proceduto nel modo seguente:

- Identificazione di strati costituiti da materiali omogenei da un punto di vista granulometrico: stante la ricostruzione della successione litostratigrafica emersa dal quadro geologico, i terreni sono distinti in funzione della dimensione prevalente dei grani; si è proceduto pertanto a le unità prevalentemente grossolane laddove rilevanti in termini idraulici o meccanici, dalle unità a carattere marcatamente coesivo;
- Ulteriore suddivisione, all'interno del medesimo gruppo, in unità geotecniche al differente comportamento meccanico espresso nel corso delle prove in situ (pocket e DMT);
- Elaborazione dei risultati dalle prove di laboratorio analizzando separatamente tutte le determinazioni provenienti dai campioni prelevati entro la medesima unità geotecnica omogena. Si è così finalizzata la caratterizzazione fisico-meccanica delle varie unità, cui corrispondono parametri geotecnici significativi.

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A.	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
PROGETTAZIONE: Mandatario Mandanti ROCKSOIL S.P.A. NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 5 di 35

2.1 INDICAZIONI GEOMECCANICHE FORNITE DALLE INDAGINI P.E.D

2.1.1 Indicazioni stratigrafiche dalle verticali di sondaggio

Le stratigrafie dei sondaggi integrativi e le prove dilatometriche effettuate, mettono in luce da un lato una certa omogeneità granulometrica dei depositi indagati, a prevalenza limoso-argillosa, interrotta localmente da orizzonti più grossolani, e dall'altro una differenza nella risposta meccanica fra i depositi prevalentemente limosi mediamente consistenti più superficiali e quelli profondi marnosi caratterizzati da ottime proprietà meccaniche ed elevata rigidezza.

Nella porzione di versante interessata dalle opere, tale netta separazione di comportamento meccanico si identifica con il passaggio della superficie di scorrimento che delimita il cinematisimo, per come è stata rilevata dalle indagini in sito; ai depositi superficiali è stata associata l'unità UG1 e a quelli più profondi l'unità UG2 (Figura 2-1).

Con riferimento al modello geologico, l'Unità geotecnica UG1 è riconducibile alle porzioni più alterata, superficiale, della facies litologica BNA1b, mentre l'unità geotecnica UG2 rappresenta le porzioni più consistenti della facies litologica BNA1b, nonché il substrato più competente della facies litologica marnosa BNA2.

L'UG1 ha spessore variabile da circa 30m nella zona di valle (S5 ed S6, DM_A), a circa 15m verso metà pendio (DM_D), a 8÷10m nella porzione più a monte (S1, S2, DM_F). L'UG2, nel modello stratigrafico, può considerarsi indefinita.

Per entrambe le unità geotecniche considerate, le caratteristiche granulometriche indicano la presenza di una matrice pelitica in percentuali tali da condizionarne completamente il comportamento meccanico.

Sebbene meno compatti dei terreni più profondi, i materiali della UG1 sono comunque caratterizzati da buona consistenza risultando ad esempio i valori delle resistenze al penetrometro tascabile generalmente superiori a 2 kg/cm².

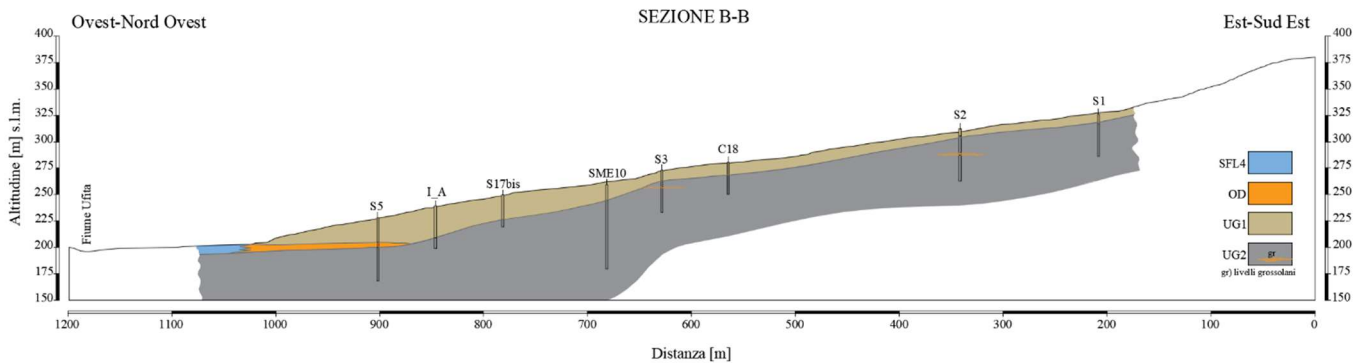


Figura 2-1 – Profilo delle unità geotecniche individuate

Nella zona bassa del versante, in tutte le verticali indagate (S5, S6 e VI03-1), fra le profondità di 25 e 28m (circa 200m l.m.m.) si ritrova un orizzonte di modesto spessore di terreno a granulometria più grossolana, ben evidenziato anche dalla perdita totale e prolungata del fluido di perforazione registrata (VI03-1) a quote corrispondenti a quelle del fondo valle, durante la perforazione. Il monitoraggio piezometrico mediante celle di Casagrande e piezometri a tubo aperto a cavallo dello strato, conferma come questo orizzonte costituisca un vero e proprio contorno drenante, come dimostrato dal brusco abbassamento della quota piezometrica che si osserva al piede del versante nei periodi caratterizzati da scarse precipitazioni. A tale orizzonte drenante è stata associata una specifica unità geotecnica (OD in Figura 2-1). Nel modello geologico tale orizzonte costituisce la porzione di base della facies BNA1b, caratterizzata da granulometria appunto più grossolana.

APPALTATORE: Consorzio HIRPINIA AV Soci SALINI IMPREGIO S.P.A. ASTALDI S.P.A.	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
PROGETTAZIONE: Mandatara ROCKSOIL S.P.A Mandanti NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 6 di 35

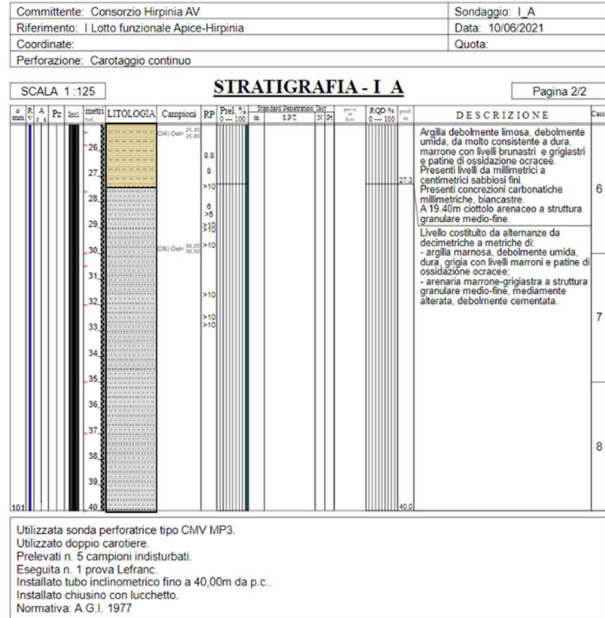
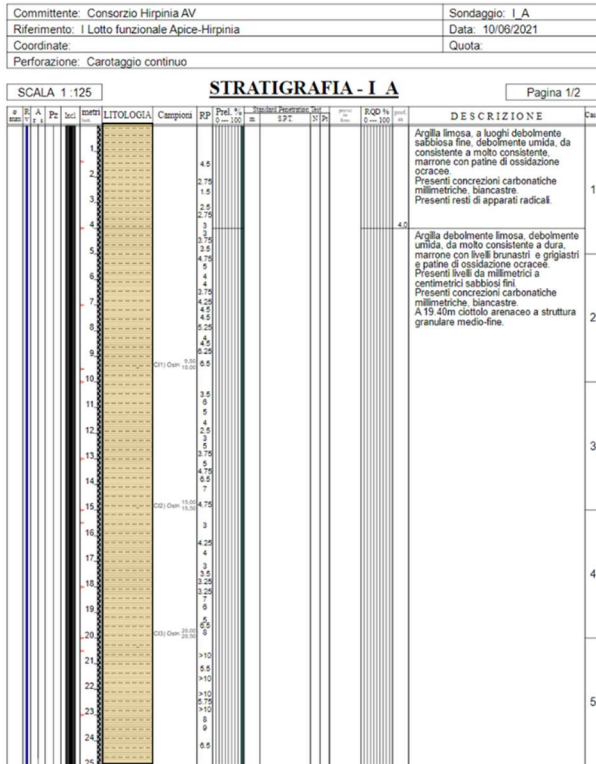


Figura 2-2 – Stratigrafia della verticale I_A



Orizzonti granulari localizzati sono stati rinvenuti nel corso dei sondaggi di P.E.D anche nella zona a monte dell'imbocco all'interno dell'unità geotecnica profonda UG2 ed in particolare:

- S2: da 22,8 a 25,5 m da p.c. (dal report della scheda di sondaggio si segnala perdita di fluido di circolazione);
- S3: da 15,8 a 17,2 m da p.c. (in tale orizzonte è stata realizzata una prova Lefranc che ha restituito un valore elevato di permeabilità).

APPALTATORE: Conorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGIO S.P.A. ASTALDI S.P.A	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
PROGETTAZIONE: Mandatara Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 7 di 35

Si sottolinea che tali intervalli, da un punto di vista granulometrico e di plasticità, sono sensibilmente differenti dal materiale a grana fine che costituisce l'unità geotecnica di riferimento (campioni rimaneggiati S2_CR3 ed S3_CR4).

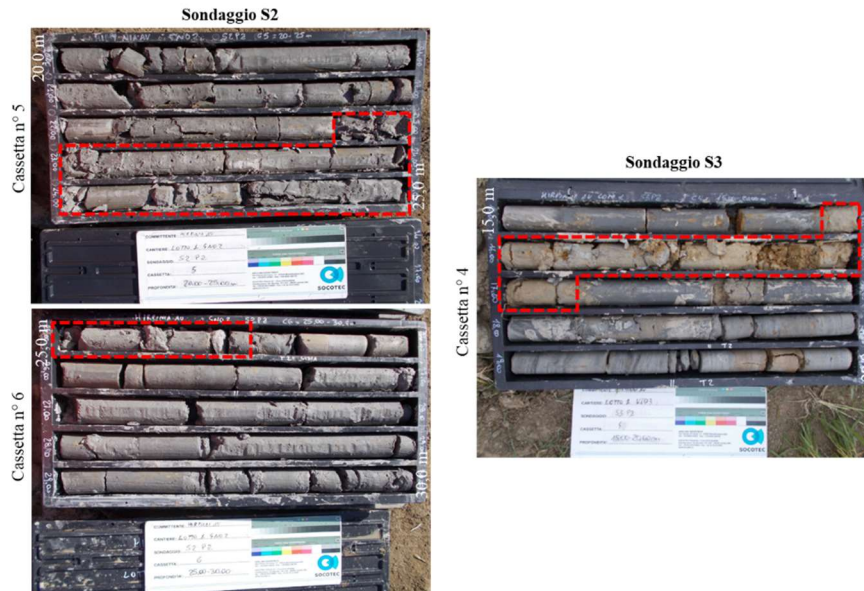


Figura 2-4 – Posizione dei livelli granulari all'interno dell'UG2 nelle verticali di sondaggio S3 e S2

2.1.2 Indicazioni stratigrafiche e geotecniche fornite dalle prove DM

Con riferimento ai risultati delle prove dilatometriche si possono effettuare le seguenti osservazioni:

- lungo la verticale DM_A, alla profondità di 12 m da p.c. si registra una locale riduzione dell'indice KD, che testimonia la presenza di una fascia di debolezza, senza che venga però raggiunto il valore critico (KD=2).
- la verticale DM_D individua una fascia rimaneggiata a circa -11-12 m da p.c. coerente con la superficie individuata nel vicino inclinometro SME10.
- numerose zone di debolezza si evidenziano per la verticale DM_E ubicata al margine sud del movimento; tali zone ricadono nella porzione più superficiale del deposito, probabilmente ascrivibili all'evidente movimento che borda il pendio su quel lato (Figura 2-5).

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGIO S.P.A. ASTALDI S.P.A		ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.							
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE		COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 8 di 35

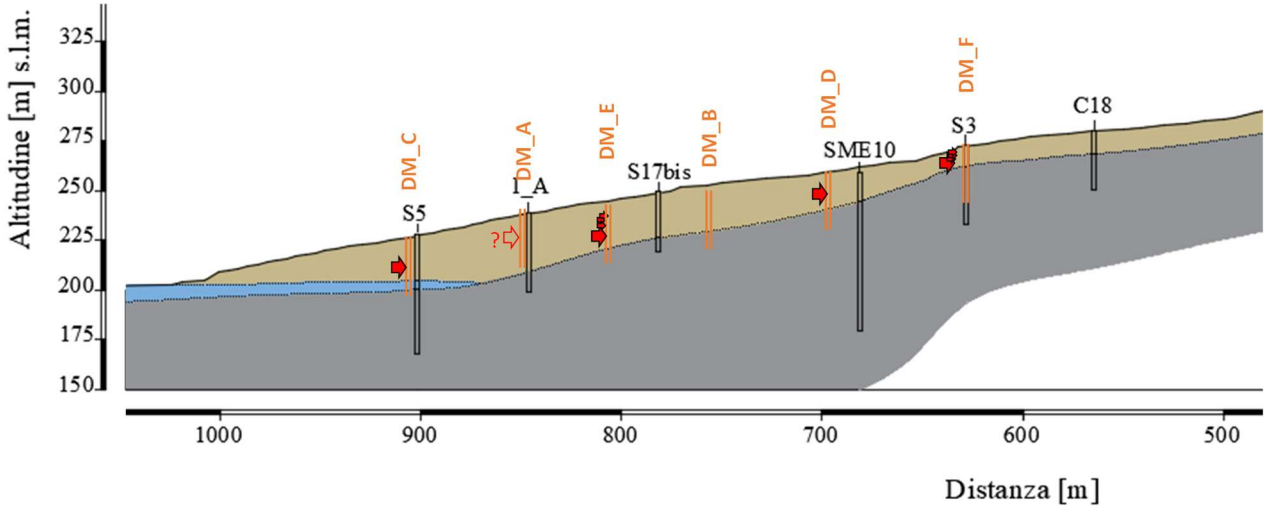


Figura 2-5 – Profilo della parte inferiore del versante con indicazione delle zone di debolezza rilevate dalle prove dilatometriche

Le prove DMT forniscono alcune utili informazioni dal punto di vista meccanico permettendo di stimare la resistenza non drenata dei terreni all'interno della unità geotecnica UG1 (Figura 2-6)

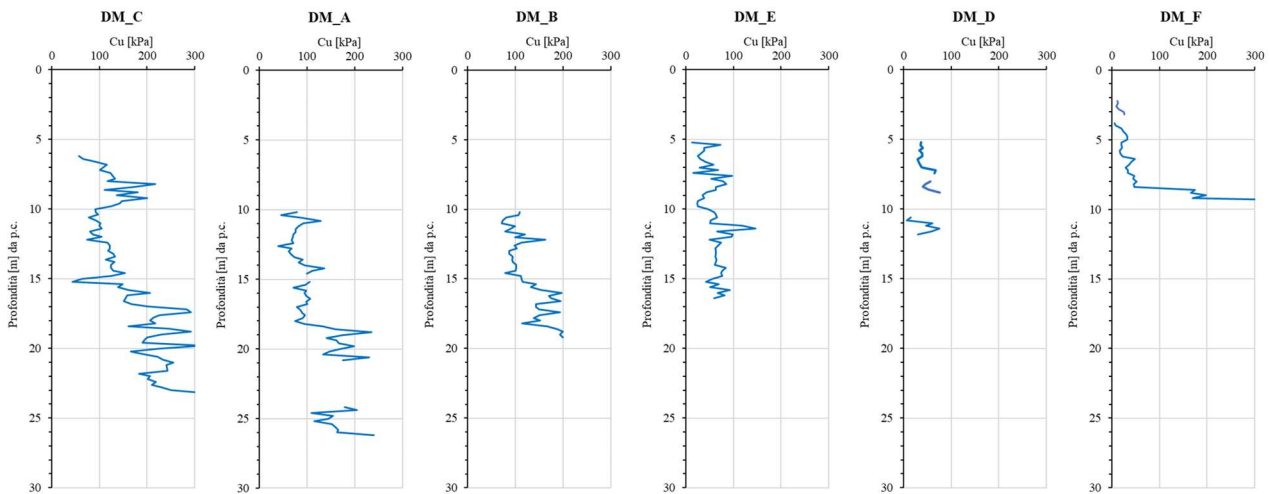


Figura 2-6 – Valori di C_u per le verticali indagate

Nella parte inferiore del versante (DM_A, DM_B, DM_C) la resistenza non drenata (C_u) risulta compresa fra 100 e 200 kPa mentre, nelle zone sommitali (DM_D e DM_F) e perimetrali (DM_E), i valori di C_u sono minori, attestandosi fra 20 e 60 kPa, e testimoniano un maggiore allentamento dovuto all'attività dei fenomeni più superficiale.

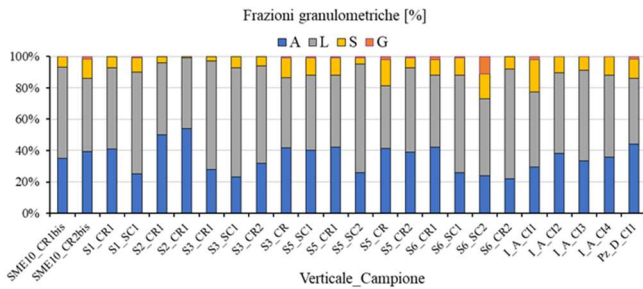
APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 10 di 35
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE						

- granulometria;
- limiti di Atterberg.

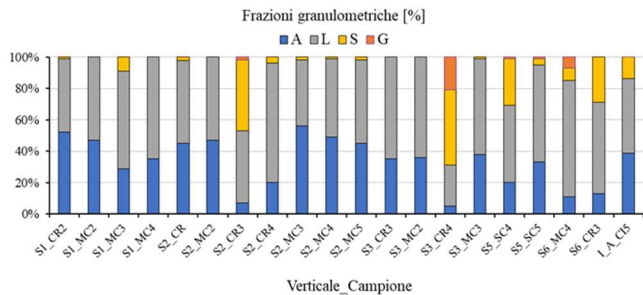
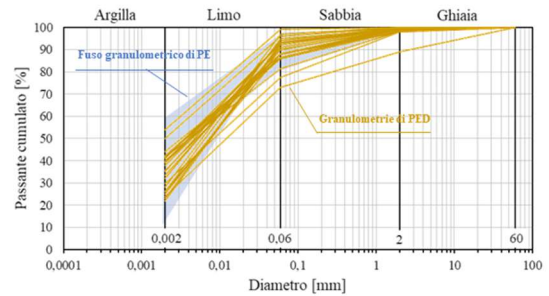
parametri di stato

- peso di volume naturale;
- contenuto d'acqua naturale;
- indice dei vuoti.

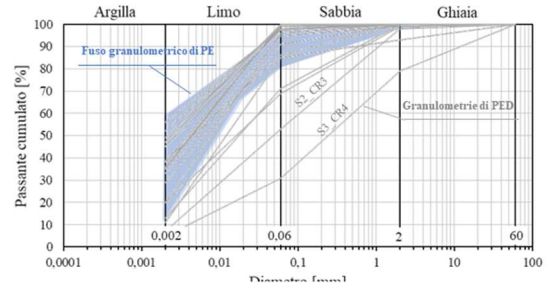
Curve granulometriche e distribuzioni delle frazioni (in accordo alle Raccomandazioni AGI,1977) sono rappresentate in Figura 2-7. Se si escludono i risultati che si riferiscono ai campioni prelevati all'interno dei livelli più grossolani dell'unità 2 (S2_CR3 ed S3_CR4), le distribuzioni granulometriche per le due unità principali (UG1 ed UG2) risultano sovrapponibili, con la frazione fine (A+L) che risulta sempre superiore al 70%.



UG1



UG2



OD

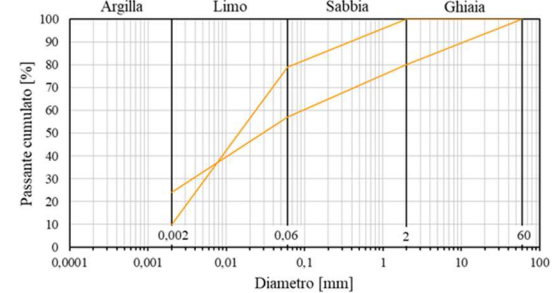
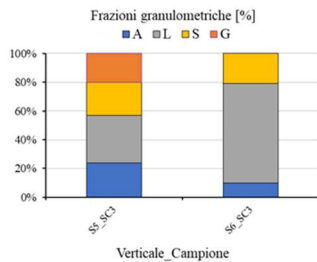


Figura 2-7 – curve granulometriche riferite alle unità geotecniche UG1 e UG2 e all'inclusione granulare OD

Anche il **peso specifico dei grani** risulta poco variabile, con valore medio γ_s di 26 kN/m³.

Sulla frazione fine dei diversi campioni sono stati determinati il limite di liquidità (LL) ed il limite di plasticità (LP). Sulla **Carta di plasticità** (Figura 2-8) i punti rappresentativi per UG1 e UG2 si collocano nel campo delle Argille inorganiche a media e alta plasticità. La frazione fine dell'unità granulare OD e dei due campioni più grossolani dell'unità 2 (S2_CR3 ed S3_CR4) è caratterizzata da bassa plasticità.

APPALTATORE: Conorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A	ITINERARIO NAPOLI – BARI				
PROGETTAZIONE: Mandatara Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA				
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A FOGLIO 11 di 35

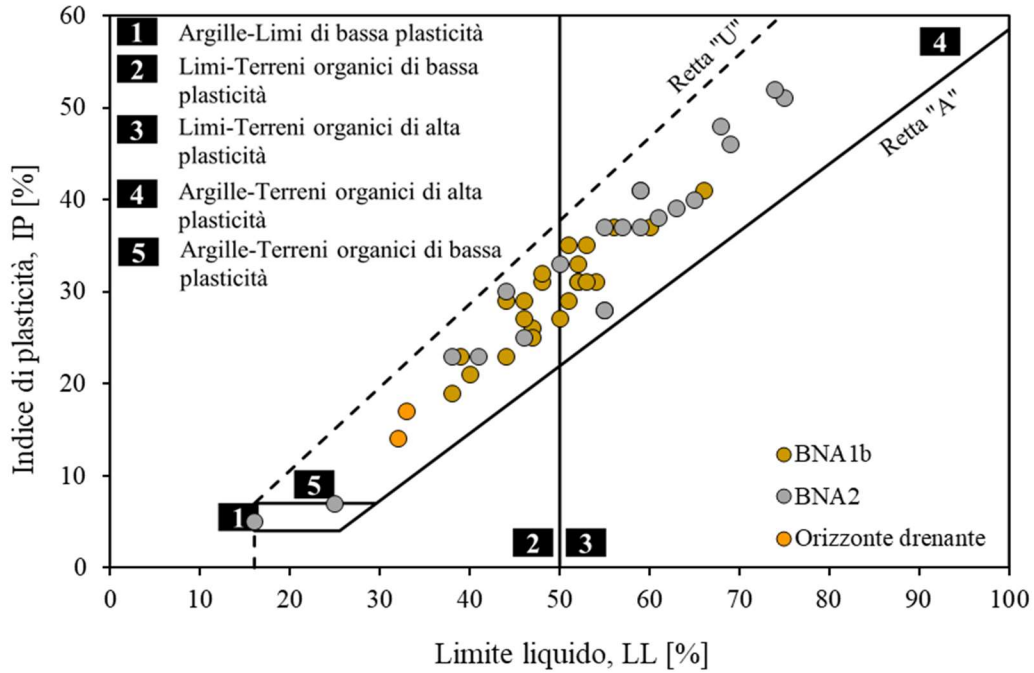


Figura 2-8 – Carta di plasticità di Casagrande

I valori del **peso dell'unità di volume** per i campioni indisturbati sono rappresentati in Figura 2-9. Per i campioni di UG1 è compreso tra 18,5 e 20,3 kN/m³ e per UG2 tra 19,5 e 21,5 kN/m³, coerentemente con l'aumento dello stato di addensamento con la profondità.

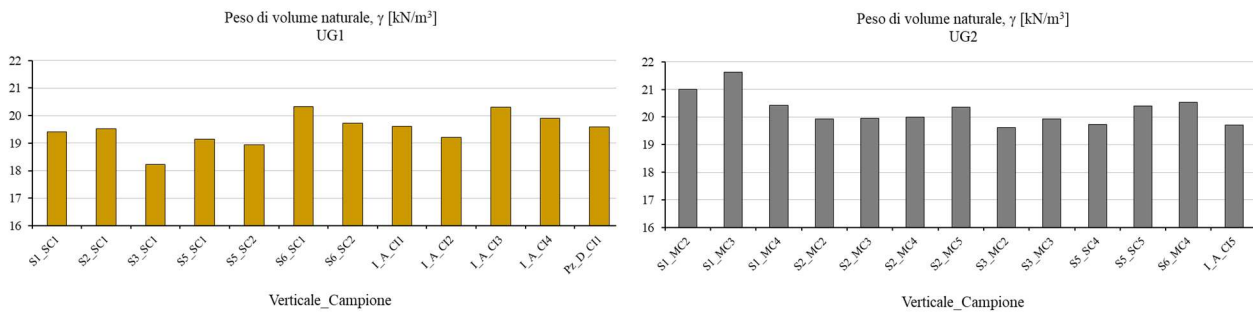


Figura 2-9 – Peso dell'unità di volume

Lo stato di addensamento maggiore per l'unità UG2 più profonda rispetto alla UG1 è testimoniato anche dai valori medi minori del contenuto d'acqua e, di conseguenza, dell'indice dei vuoti (Figura 2-10, Figura 2-11). L'indice dei vuoti (e) per l'UG1 è compreso tra 0,6 e 0,8 mentre per l'UG2 risulta compreso tra 0,4 e 0,58.

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGIO S.P.A. ASTALDI S.P.A.	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A. NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 12 di 35
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE						

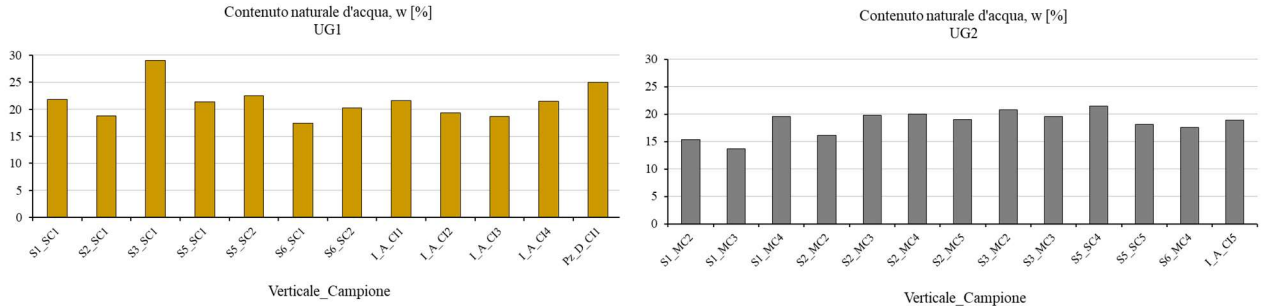


Figura 2-10 – Contenuto d'acqua naturale

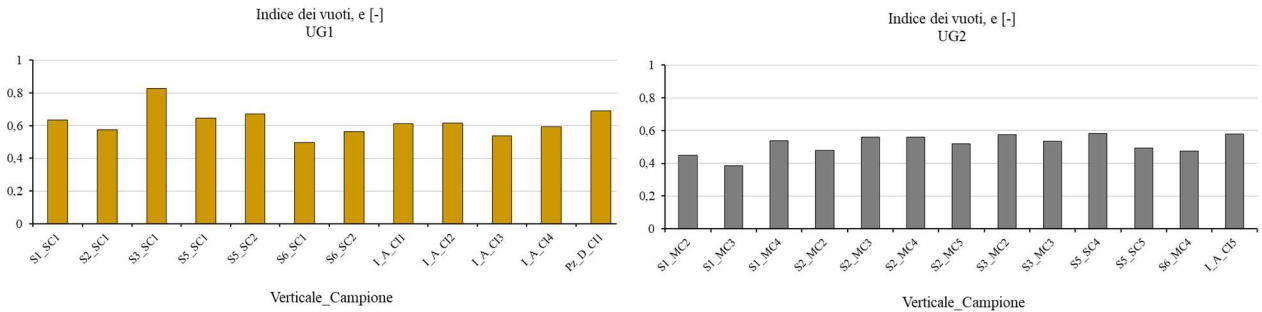


Figura 2-11 - Indice dei vuoti

2.2.2 Caratteristiche di resistenza in tensioni efficaci

UG1 - Resistenza al taglio di picco ed a volume costante

I risultati delle prove di resistenza di Taglio Diretto su campioni di terreno indisturbati dell'unità UG1 sono presentati, in Figura 2-12. I punti sperimentali si allineano su un involucro delle resistenze di picco con valori della coesione $c'_p = 14$ kPa e dell'angolo di attrito $\phi'_p = 26^\circ$.

Le prove sui campioni IA_C12 ed IA_C14, eseguite a tensioni maggiori, possono essere utili per determinare l'involucro di resistenza in condizioni di volume costante, con valore $\phi'_{cv} \approx 27^\circ$.

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A.		ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A. NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.							
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE		COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 13 di 35

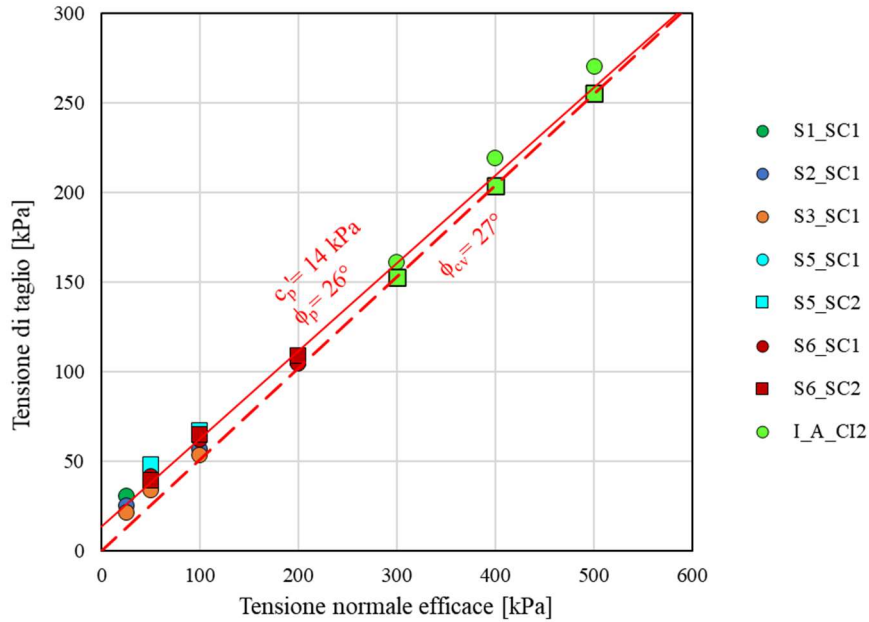


Figura 2-12 - UG1. Involuppo di rottura di picco da prove di taglio diretto

In Figura 2-13, i valori della resistenza di picco per le prove di P.E.D. (campione S6_C2 di fase I e i campioni IA_CI1 e IA_CI3 di fase 2) registrati nel corso delle prove in cella triassiale (CIU) sono messi a confronto con i valori ottenuti dalle prove realizzate per il P.E., sui campioni prelevati lungo la verticale VI03-1, nel piano degli invarianti t-s'.

Si nota come le resistenze ottenute dalle prove sui campioni IAC1 e IAC3 siano sempre inferiori a quelle dei campioni V103, probabilmente a causa del disturbo prodotto dal campionamento. Tenuto conto del comportamento fragile dei terreni indagati, le prove possono essere utili per un'indicazione approssimata dei valori di resistenza residua, piuttosto che di picco.

Le caratteristiche di resistenza del campione S5_C2, così come quelle dei campioni sottoposti a prova nel corso delle precedenti fasi progettuali nella medesima unità (VI03-1 e 2), risultano mediamente superiori a quelle ottenute dalle prove di taglio.

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGIO S.P.A. ASTALDI S.P.A		ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.		COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 14 di 35
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE							

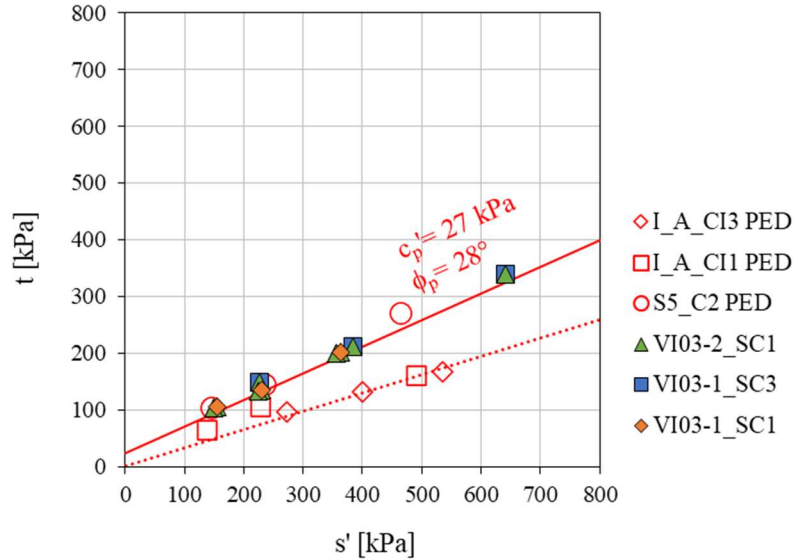


Figura 2-13 – UG1. Involuppo di rottura di picco da in cella triassiale tipo CIU

In sintesi, le caratteristiche di resistenza al taglio di picco in tensioni efficaci della unità UG1 nell'intervallo tensionale considerato, possono essere cautelativamente descritte con un involucro caratterizzato dai seguenti parametri:

$$c'_p \cong 14 \div 27 \text{ kPa} \quad \phi'_p \cong 26^\circ$$

I valori derivati per i parametri di picco risultano in accordo con i corrispondenti valori della caratterizzazione meccanica del PE.

UG2 - Resistenza al taglio di picco

I risultati delle prove di resistenza in scatola di Taglio diretto condotte su campioni di terreno indisturbati appartenenti all'unità UG2 sono presentati, in Figura 2-14. I dati sperimentali sono tutti coerenti fra loro e si allineano su un involucro di picco caratterizzato da coesione $c'_p = 18 \text{ kPa}$ e dell'angolo di attrito $\phi'_p = 25^\circ$.

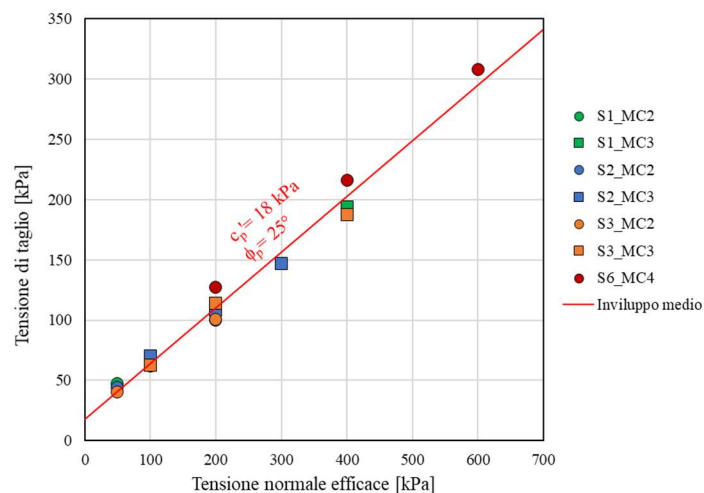


Figura 2-14 – UG2. Involuppo di rottura di picco da prove di taglio diretto

APPALTATORE: <u>Consorzio</u> <u>Soci</u> HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A.	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: <u>Mandatario</u> <u>Mandanti</u> ROCKSOIL S.P.A. NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.						
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 15 di 35

In figura si riportano gli inviluppi di rottura di picco registrati nelle prove in cella triassiale (CIU) per i campioni S5_SC4 ed S2_MC4 prelevati alla profondità di circa 40m. I valori a rottura riferiti al campione IA_CI5, non sono rappresentati in quanto la prova (P.E.D. fase 2) risulta affetta dalle medesime incertezze sperimentali illustrate in precedenza. Di nuovo i dati sperimentali sono coerenti fra loro ed individuano un inviluppo di resistenza rettilineo con coesione $c'_p = 35$ kPa e dell'angolo di attrito $\phi'_p = 28^\circ$.

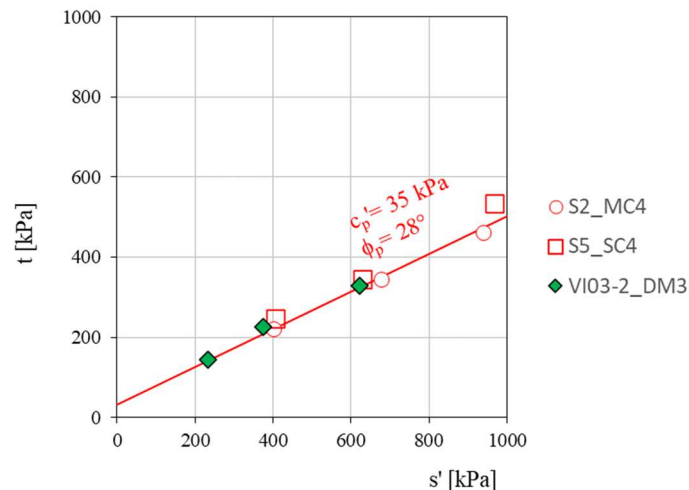


Figura 2-15 – UG2. Inviluppo di rottura di picco da in cella triassiale tipo CIU

La maggiore resistenza risultante dalle prove triassiali rispetto a quelle delle prove di taglio diretto si può interpretare come l'effetto della stratificazione che caratterizza la formazione e che favorisce la rottura nelle prove di taglio diretto (Castellanos B.A., Brandon T.L., 2013).

Le caratteristiche di resistenza al taglio di picco in tensioni efficaci della unità UG2 nell'intervallo tensionale considerato possono essere quindi cautelativamente descritte dai seguenti inviluppi:

minimo	$c'_p \cong 18$ kPa	$\phi'_p \cong 25^\circ$
massimo	$c'_p \cong 35$ kPa	$\phi'_p \cong 28^\circ$

con l'inviluppo minimo suggerito per i terreni dei depositi superficiali e l'inviluppo massimo per quelli appartenenti ai depositi marnosi profondi ($z > 25$ m).

APPALTATORE: Conorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A.	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
PROGETTAZIONE: Mandatara Mandanti ROCKSOIL S.P.A. NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 16 di 35

Resistenza al taglio residua

In virtù della omogeneità di composizione dei materiali appartenenti alle unità UG1 e UG2, la resistenza al taglio residua è risultata poco variabile.

La resistenza in condizioni residue è stata valutata sulla base delle specifiche prove eseguite dopo vari cicli di taglio diretto (TD) (sia su campioni indisturbati che rimaneggiati) o in scatola di taglio anulare (TA). Le caratteristiche dei campioni e delle modalità di prova sono riportate in Tabella 2.

Tabella 2 – caratteristiche dei campioni sottoposte alle prove per la determinazione della resistenza residua

Sondaggio_Campione	Tipologia prova	Profondità [m] da p.c.		Velocità di taglio [mm/min]	Scorrimento cum. [mm]	Frazioni granulometriche [%] secondo A.G.I.				LL [%]	LP [%]	IP [%]	ϕ_r [°]
		da	a			G	S	L	A				
SME10_CR1bis	TD	11,7	11,9	0,003	35,7	0,2	6,7	58,0	35,1	51	22	29	14,0
SME10_CR2bis	TA	13,6	13,9	0,03	27,0	1,58	12,4	46,8	39,3	40	19	21	16,2
S3_SC1	TD	4,5	5	0,006	34,2	0,0	7,0	70,0	23,0	39	16	23	16,7
S3_CR	TA	8	8,5	0,09	27,7	1,01	12,5	44,6	41,9	47	21	26	20,3
I_A_CI2	TD	15	15,5	0,002	36,4	0,2	10,0	51,8	38,0	52	21	31	21,8
I_A_CI4	TD	25,3	25,8	0,002	37,2	0,2	11,7	52,3	35,8	53	22	31	22,3
S5_CR	TA	13	13,4	0,03	24,0	1,9	16,7	40,0	41,5	44	21	23	24,2

I valori di angolo di attrito ottenuti ricadono all'interno del range atteso in base alle caratteristiche di plasticità (Figura 2-16).

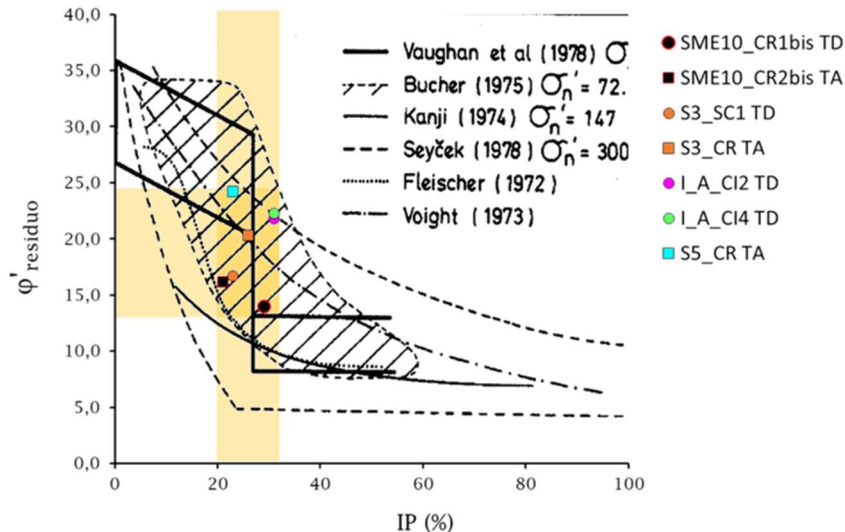


Figura 2-16 – relazione tra l'angolo d'attrito residuo e l'indice di plasticità (Lupini et al., 1981)

Si sottolinea in particolare come i campioni della verticale SME10, prelevati dalla cassetta proprio alla profondità dove si localizzano gli spostamenti in base agli inclinometri, danno valori di resistenza residua ϕ_r pari a 14° come già osservato per i campioni VI03-1 alle profondità di -11 m e -24m da p.c..

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A		ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.							
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE		COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 17 di 35

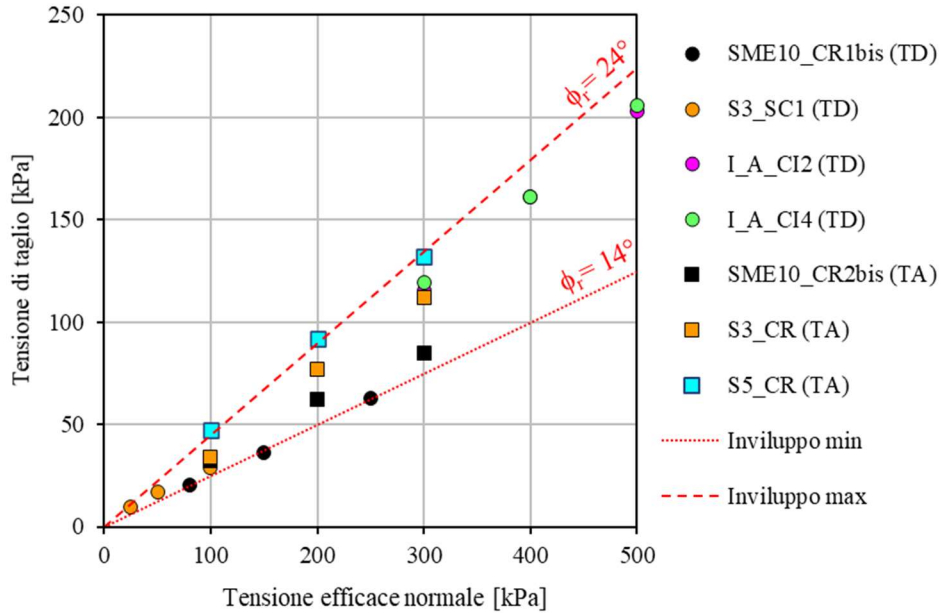


Figura 2-17 – Range degli inviluppi di rottura in condizioni residue

2.2.3 Permeabilità

Nel corso delle indagini integrative di P.E.D. (II fase), la permeabilità è stata misurata in laboratorio su un campione indisturbato della verticale Pz_D alla quota di 10-10,5 m da p.c. all'interno della formazione UG1. In particolare si è utilizzata una prova a carico idraulico variabile. Prendendo a riferimento uno sforzo efficace di 200 kPa, indice dei vuoti di 0,64, è risultato un coefficiente di permeabilità $k = 10^{-11}$ m/s.

Come si vedrà successivamente (cfr. §2.4.1), il valore misurato in laboratorio risulta decisamente inferiore ai valori che si sono ottenuti dalle prove in situ, a conferma della influenza dei livelli sabbiosi sul comportamento idraulico del deposito indagato.

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A.	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
PROGETTAZIONE: Mandatario Mandanti ROCKSOIL S.P.A. NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 18 di 35

2.3 MISURE INCLINOMETRICHE

2.3.1 I primi dati inclinometrici: 2020-2021

Il quadro attualmente delineato dal complesso delle misure inclinometriche disponibili consente di identificare la presenza di un movimento di versante lento e profondo, orientato in direzione ovest, che interferisce con le opere in corso di realizzazione.

Prendendo a riferimento le ubicazioni delle indagini, i primi dati che indicano la presenza di un dissesto profondo risalgono alla fine del 2020, quando si è reso chiaramente evidente un movimento profondo nei pressi dell'imbocco della GN04 in corrispondenza delle verticali S17bis (spostamento localizzato a -21m da p.c.), F12 (-21m da p.c.) e SME12 (-18m da p.c.), con azimut compreso fra 270 e 300°N (Figura 2-18).

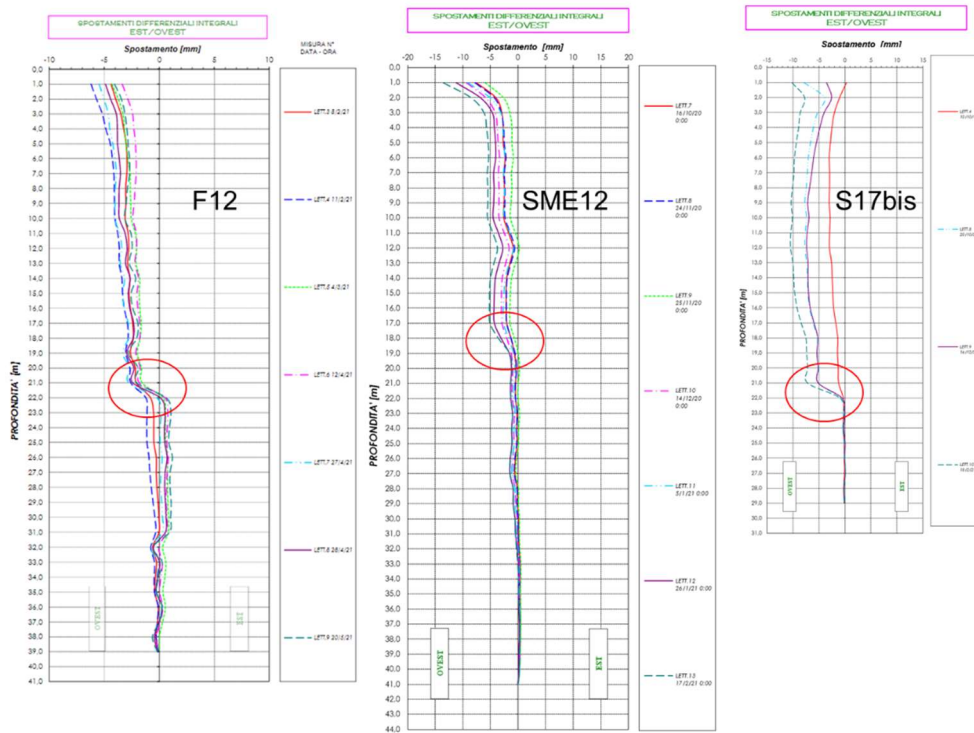


Figura 2-18 – Profili inclinometrici nel piano est.-ovest per le verticali S17bis, F12 e SME12: sono evidenziate le profondità dove si localizzano gli spostamenti

I movimenti rilevati sono coerenti in termini di azimut e velocità con il profilo inclinometrico SME10, relativo ad una verticale 100 metri più a monte, dove si ritrova una localizzazione degli spostamenti a circa 12m da p.c..

Inoltre, anche la verticale SME11, circa 200m a monte, mostrava una deformata di difficile interpretazione, ma che indicava la possibilità di movimenti collocati a 5m da p.c., all'incirca in prossimità del passaggio fra i depositi più soferficiali e la formazione (Figura 2-19).

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGIO S.P.A. ASTALLI S.P.A	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 19 di 35
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE						

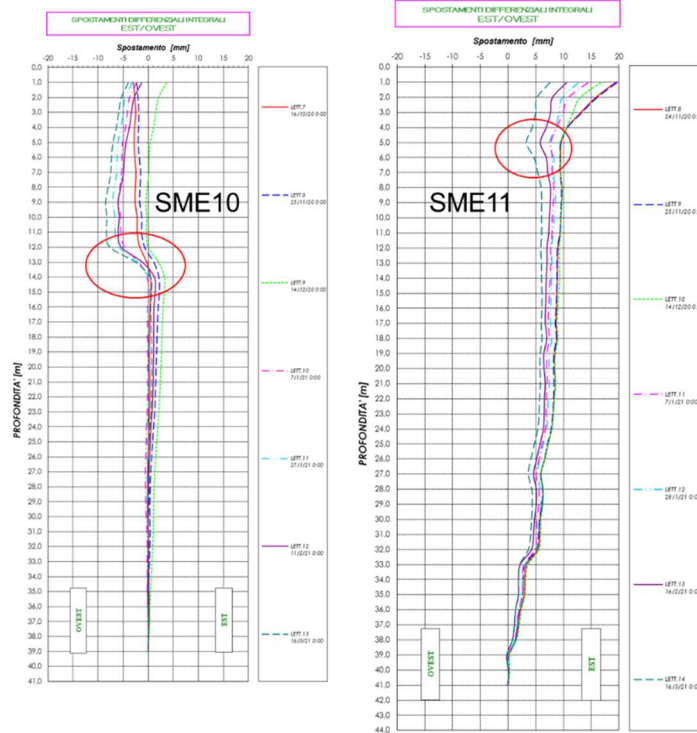


Figura 2-19 - Deformate inclinometriche est-ovest relative alle verticali SME10 e SME 11 con indicazione delle quote di possibile scorrimento

Per la zona del versante interagente con il viadotto VI03 la situazione è più complessa. Nel periodo che va dall'autunno del 2020 alla prima metà del 2021, le verticali di PE disponibili sono: la VI03-2bis posta al piede del versante e VI03-1bis collocata circa 80m a monte (Figura 2-20).

Se la verticale VI03-2bis consente di escludere la presenza di fenomeni profondi interferenti con le pile in alveo, l'interpretazione della verticale VI03-1bis, da cui risultano movimenti in prossimità del fondo foro, è dubbia in quanto, terminando la guida inclinometrica all'interno di un livello prevalentemente granulare, questa potrebbe essere soggetta a problemi di scarsa cementazione, con conseguenti errori sperimentali.

L'ipotesi di scarsa significatività del dato di movimento indicato dallo strumento VI03-1 bis è corroborata dalla non coerenza fra velocità registrata nel periodo dicembre 2020-febbraio 2021, inferiore a 0,3 mm/mese, e quella delle verticali più a monte che nello stesso periodo indicano valori di circa 1mm/mese (Figura 2-21).

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGIO S.P.A. ASTALDI S.P.A		ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.		COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 20 di 35
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE							

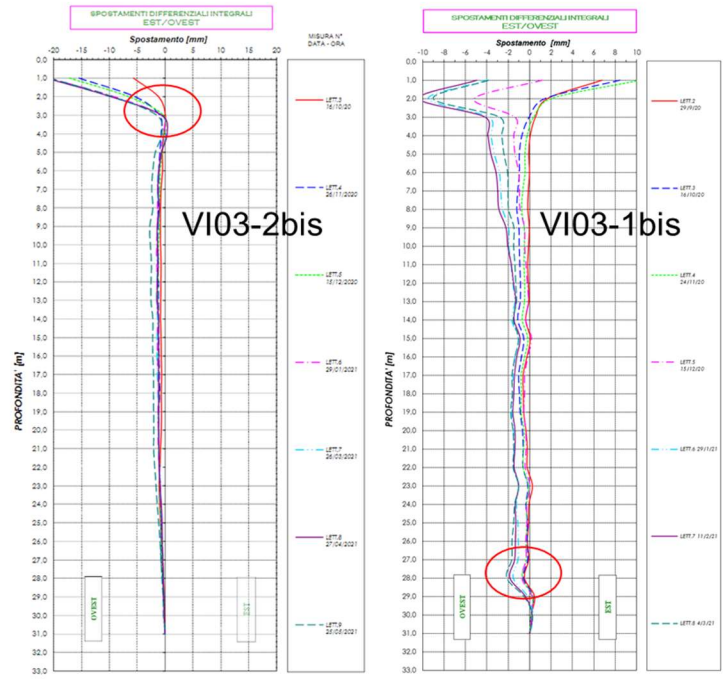


Figura 2-20 - Deformate inclinometriche est-ovest relative alle verticali VI03-2-bis e VI03-1bis con indicazione delle quote di possibile scorrimento

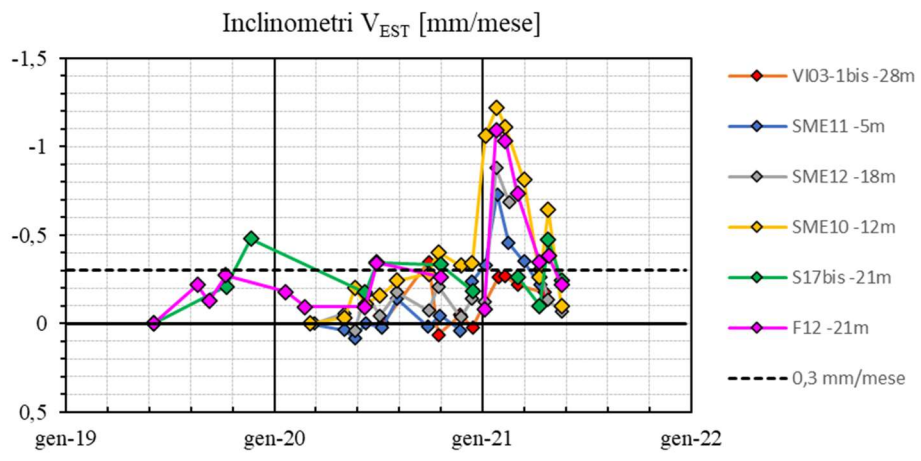


Figura 2-21 – velocità registrate alle quote di scorrimento per le verticali considerate.

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGIO S.P.A. ASTALDI S.P.A	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.						
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 21 di 35

2.3.2 Strumentazione di PED: 2021-2022

Il complesso dei dati emersi non è coerente con il modello geotecnico interpretativo adottato per il PE in base al quale, le fondazioni del viadotto sono state dimensionate assumendo come spessore massimo di terreno in movimento di 10m, sebbene escludendo l'esistenza di fenomeni di dissesto in asse tracciato.

Per aggiornare il modello geotecnico di riferimento del progetto alle nuove evidenze, l'attuale fase progettuale di PED ha previsto la messa in opera di nuove verticali inclinometriche perseguendo due principali obiettivi:

- verificare i possibili scenari di mobilitazione ad una scala più ampia;
- approfondire la geometria del fenomeno nell'area del piede del versante.

A tale scopo, l'area di indagine è stata estesa verso monte, fino alla cresta del versante, dove è stata installata la verticale inclinometrica S1, mentre ulteriori inclinometri, S5 ed S6 intestati per oltre 30m nelle marne, consentono di verificare la significatività del profilo VI03-1bis e la verticale IA è finalizzata alla ricerca di una possibile chiusura superficiale del cinematismo.

I profili inclinometrici incrementali disponibili fino a marzo 2022 sono illustrati in Figura 2-22 prendendo come riferimento di zero la lettura di settembre 2021. Con tale riferimento, si escludono i possibili errori sperimentali introdotti da una riparazione della sonda inclinometrica avvenuta ad agosto 2021.

Fra le letture di dicembre 2021 e marzo 2022 tutte le verticali hanno messo in evidenza incrementi di spostamento dell'ordine di 1-2mm localizzati alle medesime quote che si potevano individuare, seppure in modo meno evidente, già a inizio 2021 dai profili inclinometrici di PD e PE.

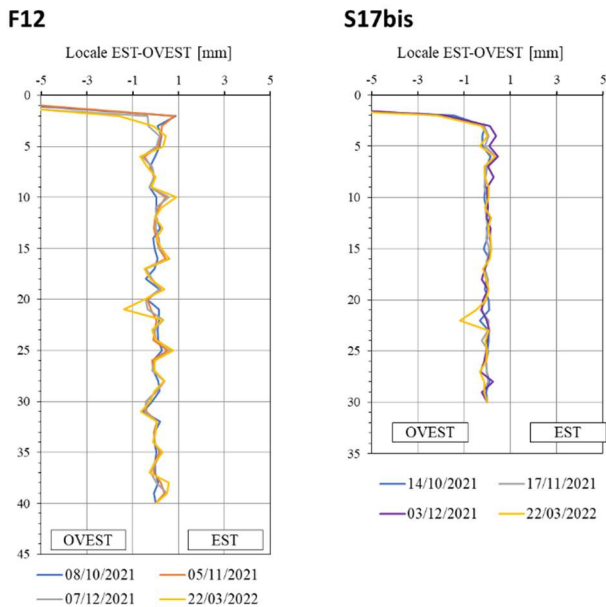


Figura 2-22 – Inclinometri PD. Spostamenti locali in direzione Est-Ovest.

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGIO S.P.A. ASTALDI S.P.A		ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.							
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE		COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 22 di 35

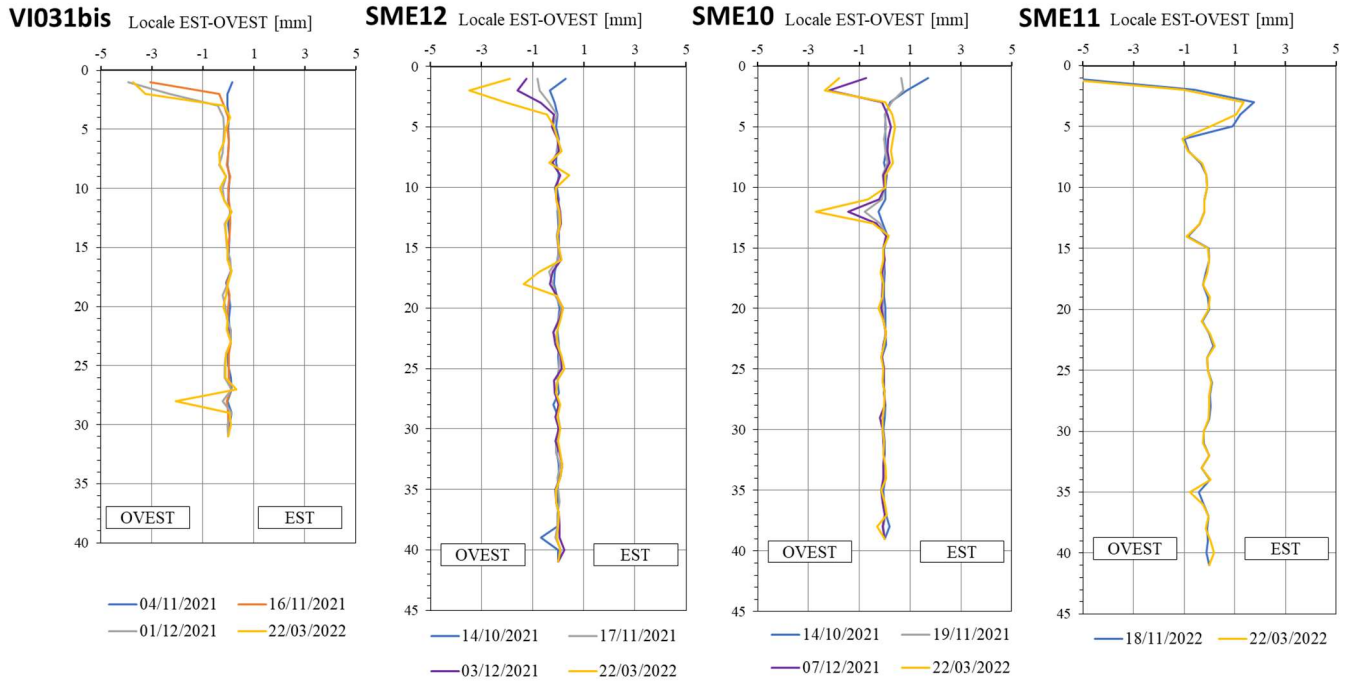


Figura 2-23 – Inclinometri PE. Spostamenti locali in direzione Est-Ovest.

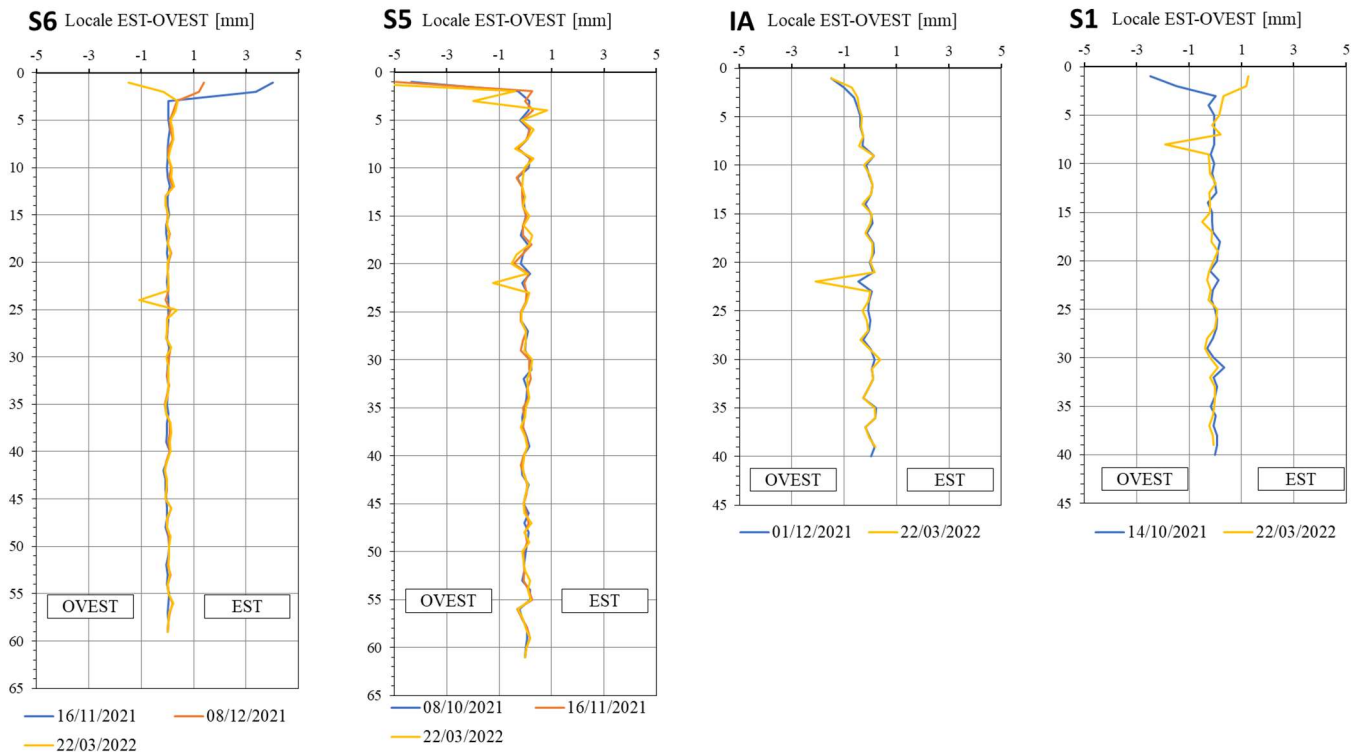


Figura 2-24 – Inclinometri PED. Spostamenti locali in direzione Est-Ovest.

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A		ITINERARIO NAPOLI – BARI					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.		RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE		COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 23 di 35

Il quadro sperimentale che emerge dalle nuove osservazioni delinea la presenza di un cinematismo di frana profonda, che si estende a monte e a valle della zona di imbocco Nord della galleria GN02, con profondità di circa 20÷22 m nella porzione inferiore del versante e di circa 6÷10 m verso monte. La forma della superficie di scorrimento che si può dedurre dalla traccia degli spostamenti nei profili inclinometrici incrementali e integrali è quello indicato in Figura 2-25.

In Figura 2-26 sono invece illustrati gli andamenti nel tempo degli spostamenti alle rispettive profondità dove sono localizzati.

La velocità media di spostamento è modesta, dell'ordine dei 5mm/anno per la verticale SME10, con punte massime di 10÷15 mm/anno nei periodi di maggiore attività.

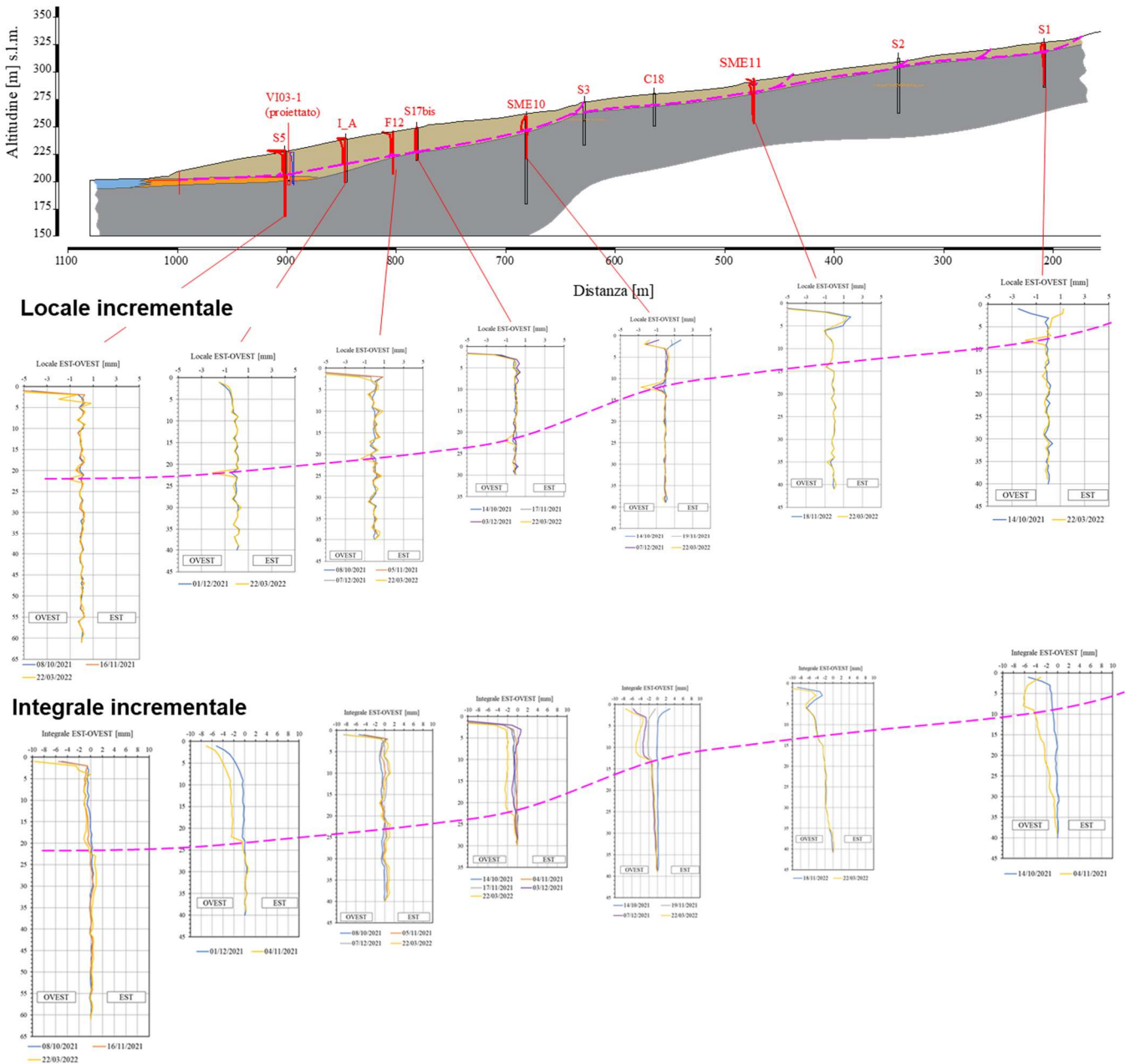


Figura 2-25 – Sezione B-B'. Profili inclinometrici incrementali in direzione Est-Ovest.

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO IF28 01 V ZZ RH OC0101 281 A 24 di 35

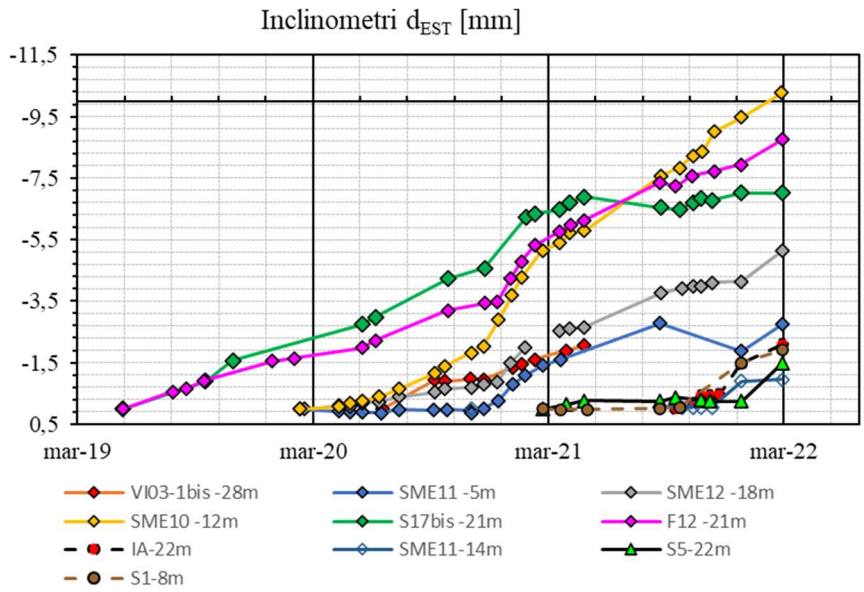


Figura 2-26 – Andamento nel tempo degli spostamenti inclinometrici alle profondità di scorrimento.

APPALTATORE: Conorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
PROGETTAZIONE: Mandatara Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 25 di 35

2.4 VALUTAZIONI IDRAULICHE E PIEZOMETRICHE

2.4.1 Permeabilità da prove in foro

Nella seguente Tabella 3 sono riassunti i risultati delle prove Lefranc.

Tabella 3 – Prove Lefranc. Sintesi delle caratteristiche di prova e dei relativi risultati

Sondaggio	Quota [m s.l.m.]	Prof. del tratto indagato [m] da p.c.		Modalità della prova		Permeabilità [m/s]	Note	
		da	a	In abbassamento	In risalita			
S2	312,5	12	14	×		3,5E-10	-	
		2,4	3	×		4,7E-06	Eseguita su materiale superficiale molto "allentato"	
S3	273,0	9	11	×		8,3E-10	-	
		2,2	3	×		1,0E-05	Eseguita su materiale di riporto	
		10,5	12	×		8,0E-09	-	
S5	228,3	16	16,8	×		5,3E-06	Eseguita su livello grossolano	
		6,5	7	×		1,2E-08	-	
S6	225,5	14	15	×		3,4E-09	-	
		5	6	×		1,8E-09	-	
PED	240,4	24	25	×		2,7E-07	Eseguita su orizzonte drenante	
		Pz_A	13	14		×	2,2E-07	-
		Pz_B	18	19		×	3,8E-07	-
		Pz_C	18	19	×		8,2E-07	-
Pz_D	259,7	8	9	×		5,6E-08	-	

Sulla base dei risultati si può affermare che l'unità geotecnica UG2 presenta valori del coefficiente di permeabilità (orizzontale) dell'ordine di 10^{-9} ÷ 10^{-10} m/s. Peraltro, in corrispondenza di livelli di materiale grossolano, la permeabilità cresce considerevolmente con valori di k dell'ordine di 10^{-6} m/s.

Per quanto riguarda l'unità geotecnica UG1, i valori di permeabilità risultano più dispersi e maggiori di quelli di UG2, in un range compreso indicativamente tra 10^{-7} ÷ 10^{-9} m/s. I valori più elevati, superiori a 10^{-7} m/s, sono stati registrati per le verticali Pz_A, Pz_B e Pz_C: si sottolinea che i tratti di prova di queste verticali sono stati realizzati in corrispondenza della posizione della superficie di scorrimento (rilevata o assunta). Ciò sembrerebbe indicare come quest'ultima, caratterizzata da una struttura più "aperta" rispetto al materiale circostante intatto, possa rappresentare una fascia a permeabilità maggiore, ovvero una via preferenziale per la circolazione delle acque di falda.

Sull'unità geotecnica definita OD, infine, è stata condotta un'unica prova Lefranc che ha restituito il valore di circa 3×10^{-7} m/s.

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A.	ITINERARIO NAPOLI – BARI				
PROGETTAZIONE: Mandatario Mandanti ROCKSOIL S.P.A. NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA				
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A FOGLIO 26 di 35

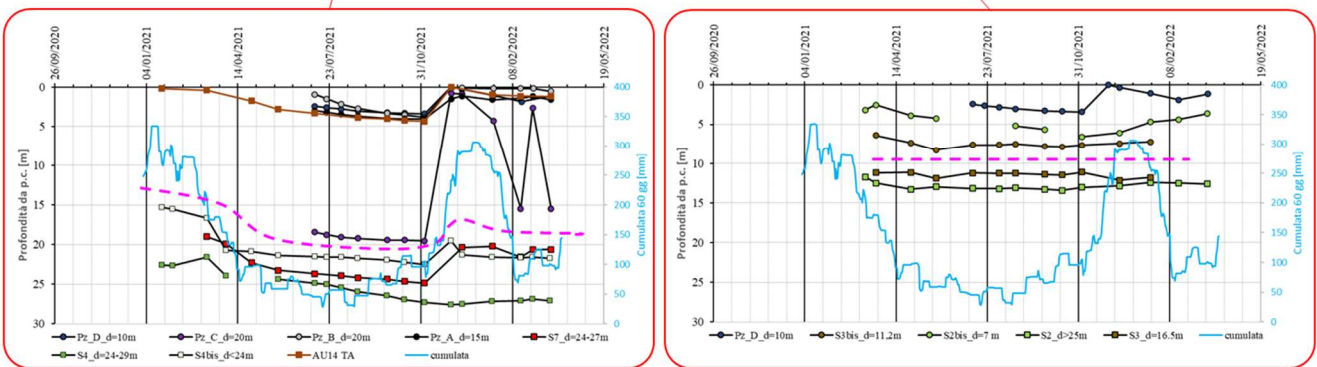
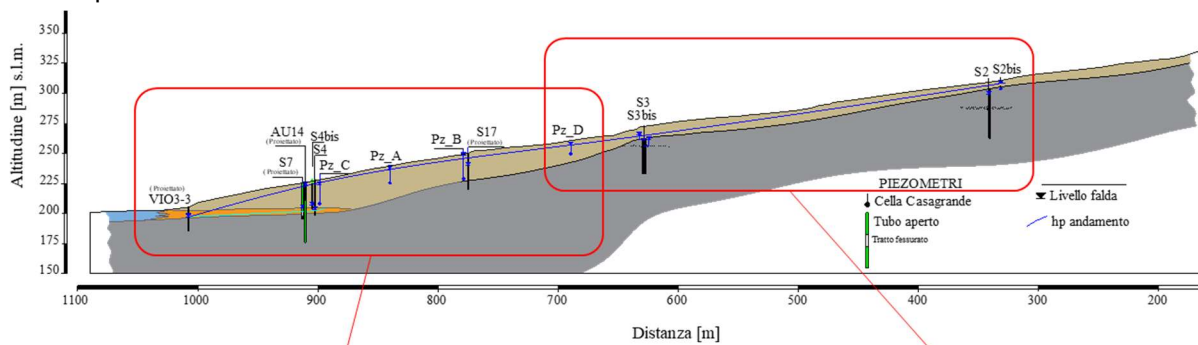
2.4.2 Dati di monitoraggio piezometrico

Le verticali di monitoraggio piezometrico disponibili per P.D. e P.E. erano: VI03-3, AU14 e S17. Nonostante la presenza di tali strumenti, in fase di PED si è ritenuto conveniente integrare le indagini con nuovi e più numerosi strumenti.

Sono state in particolare realizzate verticali piezometriche di tipo Norton (S4, S4bis, S7) e a cella di Casagrande (S2, S2bis, S3, S3bis, PzA, PzB, PzC e PzD), con sensori collocati in prossimità della superficie di scorrimento ipotizzata (PzC e PzD) ed al di sopra di essa, nonché è stata incrementata frequenza delle misure.

Le nuove misure piezometriche, sintetizzate in Figura 2-27, mettono in luce i seguenti aspetti:

- nella parte bassa del pendio, all'interno del corpo di frana, il livello freatico rimane sempre prossimo al p.c. mentre al di sotto della presunta superficie di scorrimento il livello rimane più basso, circa 20m da p.c.;
- la cella PzC posta poco al di sopra della superficie di scorrimento ipotizzata (20m da p.c.) registra una forte escursione in corrispondenza dei periodi di precipitazione più intensa, sollevandosi da circa -20m fino a p.c., fra l'inizio di novembre e l'inizio di dicembre 2021. Lo strumento sembra infatti influenzato dalla presenza del sottostante livello granulare posto a circa 24m da p.c.;
- l'andamento delle quote piezometriche rilevato dagli strumenti della parte bassa del pendio è in generale correlabile con quello delle precipitazioni cumulate a 60 giorni. Tale correlazione risulta meno evidente per i piezometri a monte.



--- Linea di separazione fra le letture degli strumenti posti al di sopra della superficie di scorrimento ed al di sotto di essa

Figura 2-27 – misure piezometriche campagna integrativa di PED

Il dato sulla presenza di livelli freatici prossimi al p.c. all'interno del volume di terreno soggetto a dissesto risulta in pieno accordo con la presenza di zone umide in corrispondenza della stazione di sondaggio B e con la presenza di un pozzo con livello a p.c. nei pressi del sondaggio stesso (Figura 2-28).

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.						
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 27 di 35

Si segnala inoltre che la prova di permeabilità in foro eseguita proprio sulla verticale Pz_B ad una profondità di circa 18-19m registrava un livello piezometrico superiore al p.c. tanto da dover eseguire la prova con flusso idraulico in risalita.



Foto scattate il 14-06-2021

Figura 2-28 – Zone di ristagno osservabili in corrispondenza della stazione di indagine B e ubicazione del pozzo

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGIO S.P.A. ASTALDI S.P.A.	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandatario Mandanti ROCKSOIL S.P.A. NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.						
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 28 di 35

2.5 CONFRONTO CON I RISULTATI DELLE INDAGINI GEOFISICHE

Le indagini sismiche a rifrazione presentate nel report interpretativo AKRON e relative tavole, consentono di estrapolare i risultati presentati ai paragrafi precedenti lungo i profili di indagine considerati. Nel seguito viene preso in considerazione il profilo L2 coincidente con la sezione B-B' orientata secondo l'azimut del movimento.

In figura si riporta la sovrapposizione fra la mappa a colori del gradiente di velocità delle onde di compressione (V_p) e la posizione della superficie di scorrimento individuata dagli inclinometri.

Il lineamento nero indica la superficie di maggior gradiente ovvero il passaggio fra i materiali superficiali e la formazione; tale lineamento coincide sia con il passaggio fra UG1 ed UG2 che risulta dall'insieme dei sondaggi, sia con la superficie di rottura descritta dagli inclinometri.

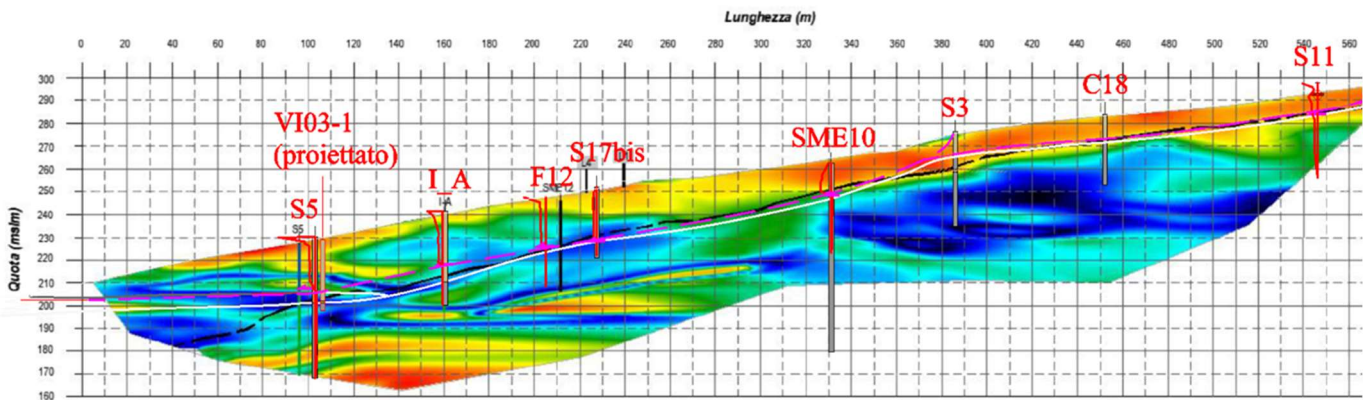


Figura 2-29 – Sezione L2: sovrapposizione fra le matrici del gradiente V_p e la posizione della superficie di scorrimento individuata dagli inclinometri (blu=0; Rosso=170)

Il profilo delle velocità delle onde di compressione V_p permette anche di individuare, seppure in forma qualitativa, la presenza di terreni saturi (sotto falda), per i quali V_p si pone tipicamente pari a 1500m/s.

Risulta interessante osservare come verso monte, coerentemente con quanto evidenziato dalle misure piezometriche, il livello freatico rimane al contatto fra le due unità, mentre verso valle risulta influenzato dalla presenza del livello granulare presente a quota circa 200m su l.m.m.

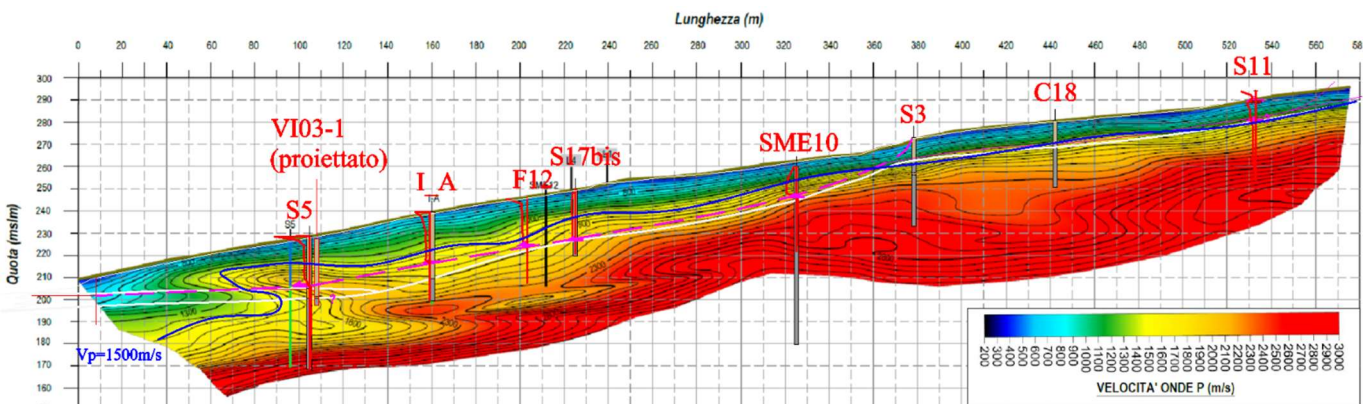


Figura 2-30 – Sezione L2: sovrapposizione fra le matrici del gradiente V_p e la posizione della superficie di scorrimento individuata dagli inclinometri

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.						
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 29 di 35

2.6 IPOTESI SULLA CINEMATICA DEI MOVIMENTI DI VERSANTE

2.6.1 Influenza della pluviometria sullo sviluppo dei movimenti inclinometrici

In Figura 2-31 si riporta la sovrapposizione fra l'istogramma delle precipitazioni medie mensili (valutate nel periodo che va dal 2009 al 2020) e quelle misurate dalla stazione di Melito Irpino per gli anni 2019-2022.

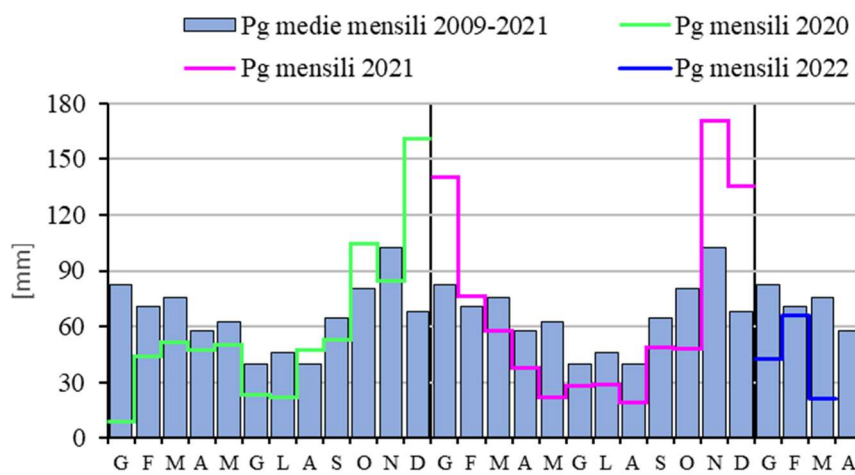


Figura 2-31 – Stazione pluviometrica di Melito Irpino. Confronto fra precipitazioni medie mensili dal 2009 al 2019 vs precipitazioni mensili del periodo 2020-2022.

Si osserva come i recenti periodi di eccedenza pluviometrica rispetto alle medie mensili risultino verificarsi nei mesi di dicembre e gennaio.

Negli stessi mesi si assiste ad un aumento dell'andamento della precipitazione che determina generale accelerazione del fenomeno (Figura 2-32). In particolare gli spostamenti risultano ben correlabili alla piovosità, considerando una precipitazione cumulata su un periodo di circa 60 giorni. D'altra parte risulta un certo sfasamento fra gli spostamenti della porzione inferiore del versante (S5, S6 ed IA) rispetto a quelli del tratto a monte, con questi ultimi che anticipano quelli precedenti.

Il controllo dell'idraulica del versante appare dunque un fattore chiave per conseguire adeguati margini di stabilità.

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGIO S.P.A. ASTALDI S.P.A.		ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A. NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.		COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 30 di 35
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE							

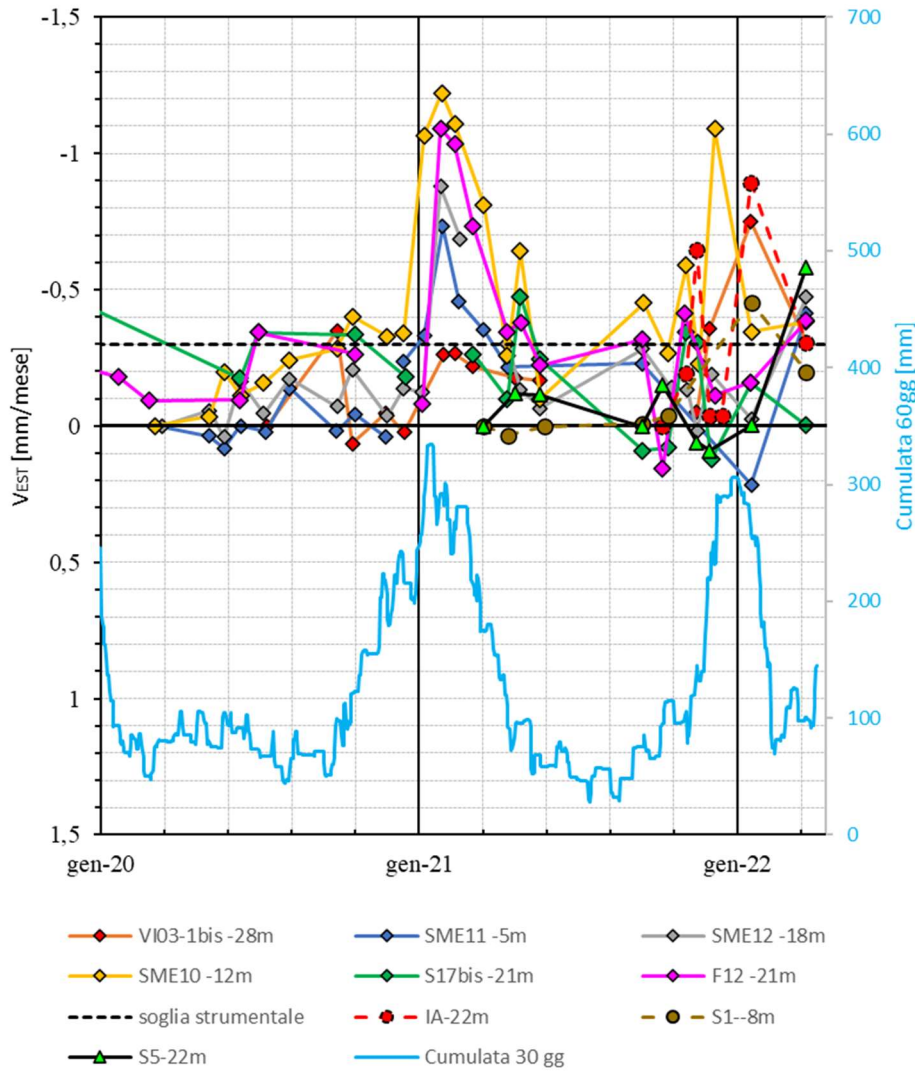


Figura 2-32 – Andamento nel tempo delle velocità di spostamento inclinometrici alle profondità di scorrimento.

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A.	ITINERARIO NAPOLI – BARI					
PROGETTAZIONE: Mandatario Mandanti ROCKSOIL S.P.A. NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 31 di 35

2.6.2 Modello geometrico ed idraulico del corpo di frana

La posizione delle quote di scorrimento indicate dagli inclinometri (Figura 2-33) può essere messa in relazione con alcune delle zone di debolezza individuate mediante prove dilatometriche e soprattutto delle misure inclinometriche eseguite dopo dicembre 2022 (Figura 2-25).

Alla luce di tali evidenze cinematiche e dal quadro stratigrafico emerso a seguito delle indagini geognostiche è possibile ricostruire un modello geometrico ed idraulico affidabile del fenomeno di dissesto.

Lo scorrimento si verifica in prossimità del contatto fra UG1 e UG2.

È possibile distinguere due corpi in movimento all'interno del cinematisma rilevato:

Il primo corpo è quello principale che raggiunge la profondità di 20÷24m ed interessa la parte inferiore del versante; questo corpo in movimento coinvolge per intero l'imbocco GI04 della galleria di lineaGN02 e chiude al piede del pendio a quota 200m su l.m.m. all'incirca a 22÷24m da p.c. al di sopra dell'orizzonte drenante. È probabile che si tratti del "motore" del movimento, sensibile all'innalzamento del livello freatico che si verifica nei periodi caratterizzati dalle precipitazioni più intense.

La complessità interna a questo settore del movimento è testimoniata sia dalla presenza di fasce di spessore anche modesto capaci di generare delle sovrappressioni idrauliche su orizzonti concentrati (probabilmente coincidenti con le superfici di scorrimento, sia dal ritardo esibito da alcuni inclinometri (S5 ed S6) posti nella porzione inferiore rispetto al picco del periodo di precipitazione.

Il settore a monte dell'imbocco (monitorato dagli inclinometri SME 11 ed S1), è probabilmente un fenomeno "secondario", effetto secondario del richiamo esercitato dal movimento principale; il corpo di terreno è caratterizzato da spessore compresi fra 5 e 10m e si estende fino quasi alla cresta del versante, dove risultano evidenti le fessure di trazione.

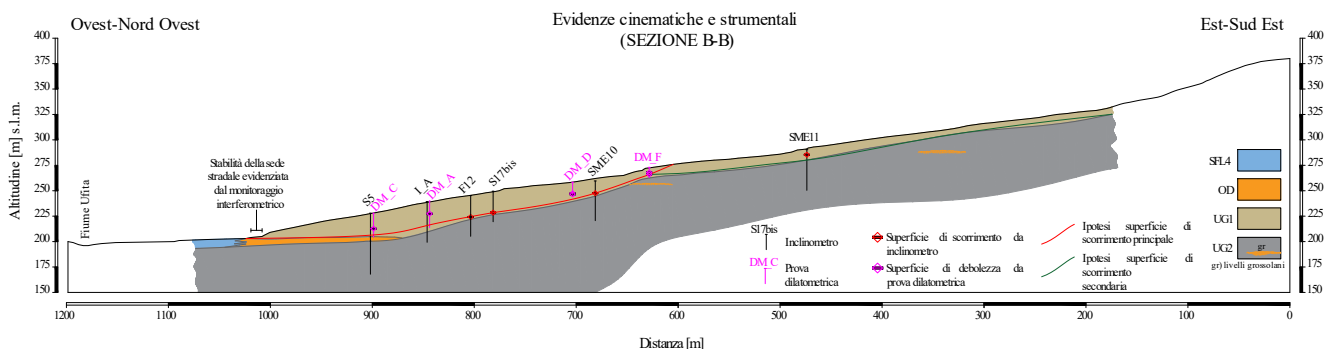


Figura 2-33 – Geometria del corpo di frana. Sezione di riferimento B-B'

Dal punto di vista dell'idraulica di versante, il livello idraulico all'interno del corpo principale varia fra -5m da p.c. e quota p.c., in ragione dell'andamento delle precipitazioni mentre, nella zona secondaria a monte, tale oscillazione risulta ridotta e la falda rimane mediamente stabile, pochi metri al disotto del p. c.

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A		ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.							
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE		COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 32 di 35

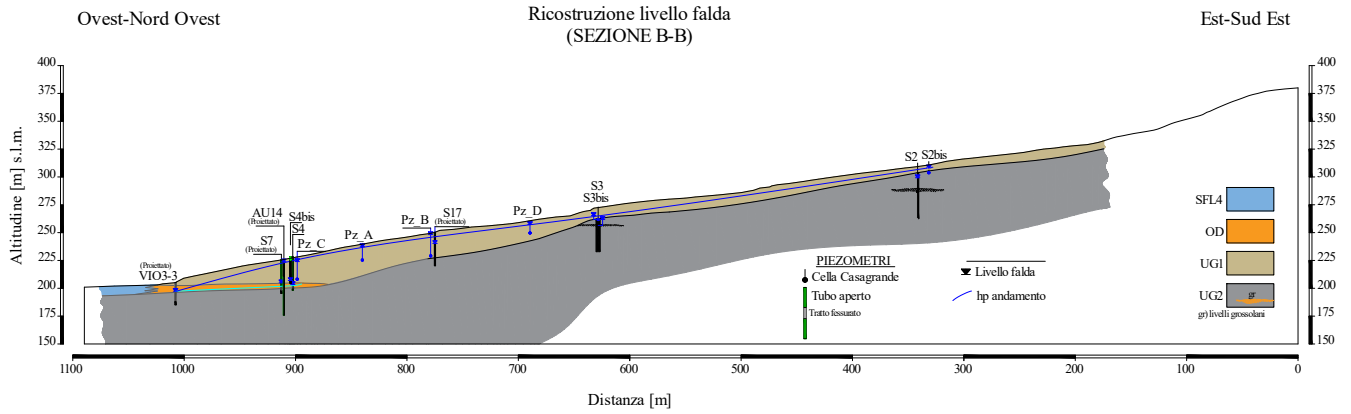


Figura 2-34 – Livelli piezometrici all'interno del corpo di frana. Sezione di riferimento B-B'

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGIO S.P.A. ASTALDI S.P.A.		ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A. NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.		COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 33 di 35
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE							

2.6.3 Analisi di sensitività

Definito il modello geotecnico di riferimento del pendio in termini di geometria del fenomeno e condizioni al contorno di tipo idraulico le analisi a ritroso presentate nel seguito hanno l'obiettivo di valutare l'ammissibilità cinematica alla luce dei parametri geotecnici ottenuti attraverso le prove di laboratorio.

Per il caso specifico sono state condotte analisi all'equilibrio limite sotto le ipotesi di Morgenstern e Price in riferimento ai cinematismi individuati: il cinematismo principale (in rosso) si sviluppa nel settore inferiore del versante ed il cinematismo secondario (in verde) si estende a monte della verticale S3bis.

Nelle analisi è stata fatta variare la condizione idraulica al contorno del versante fra i due livelli limite registrati nel corso del monitoraggio recente (cfr Figura 2-34): novembre (min) e dicembre (max) 2021 andando a verificare i valori dell'angolo di attrito residuo che determinavamo fattori di sicurezza prossimi all'unità.

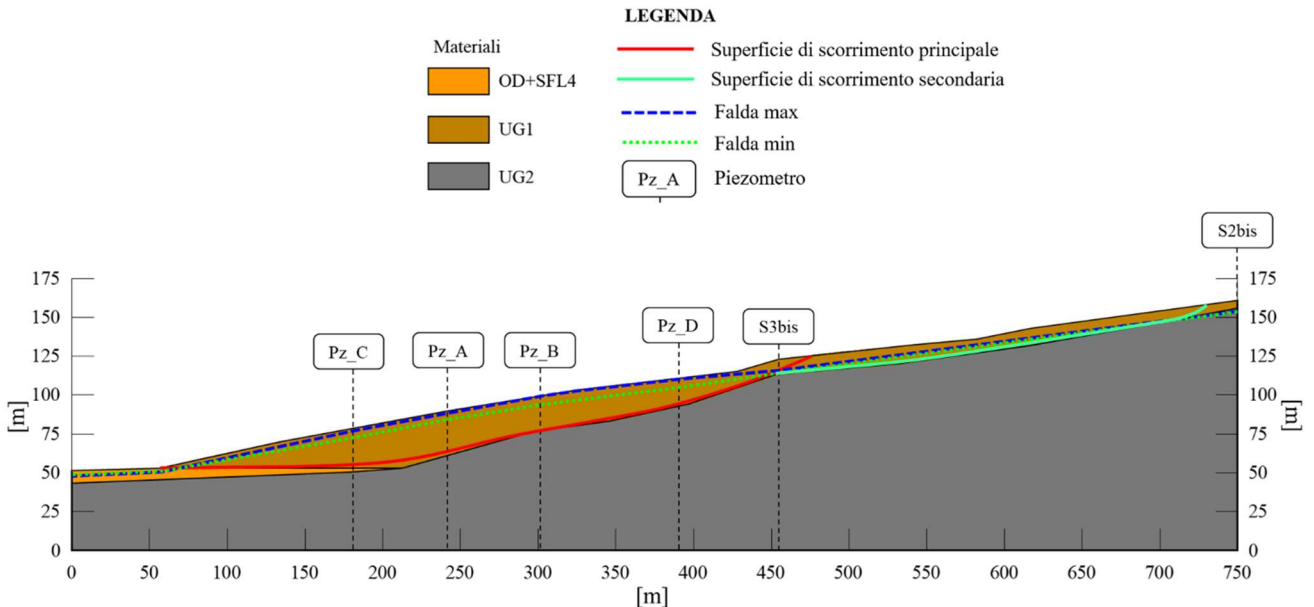


Figura 2-35 – ipotesi geometriche e piezometriche di partenza adottate per le analisi

Adottando l'ipotesi di falda minima (posta a -5m da p.c. nei piezometri Pz_C, Pz_A, Pz_B e Pz_D), il cinematismo principale (superficie in rosso) raggiunge la condizione di instabilità incipiente ($FS \approx 1$) per valori di attrito residuo (ϕ'_r) pari a 14° .

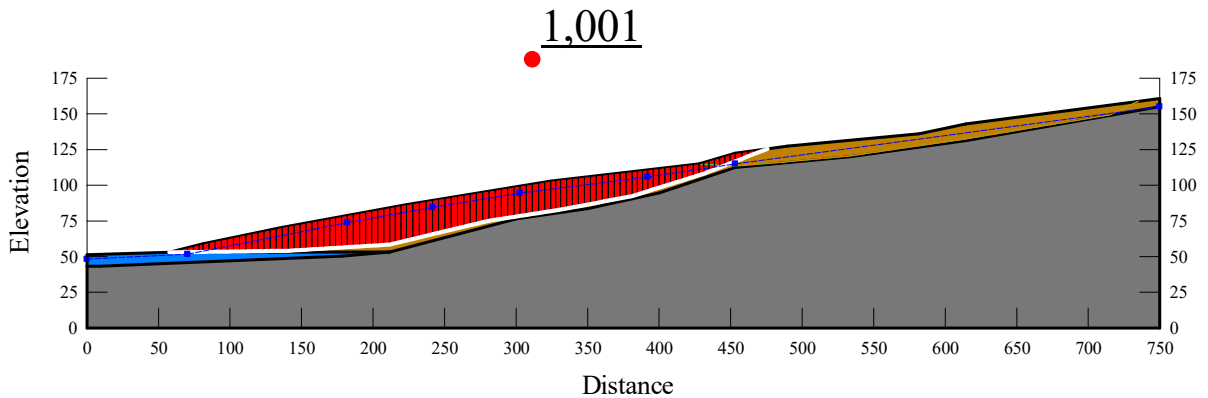


Figura 2-36 – Falda minima + $\phi'_r = 14^\circ$. Cinematismo principale

APPALTATORE: Conorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A		ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandatara Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.							
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE		COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 34 di 35

Adottando l'ipotesi di falda massima (cioè falda a p.c.) si verificano i seguenti scenari:

- a) il cinematismo principale (superficie in rosso) raggiunge la condizione di instabilità incipiente ($FS \approx 1$) per valori di attrito residuo (ϕ'_r) pari a 17°;

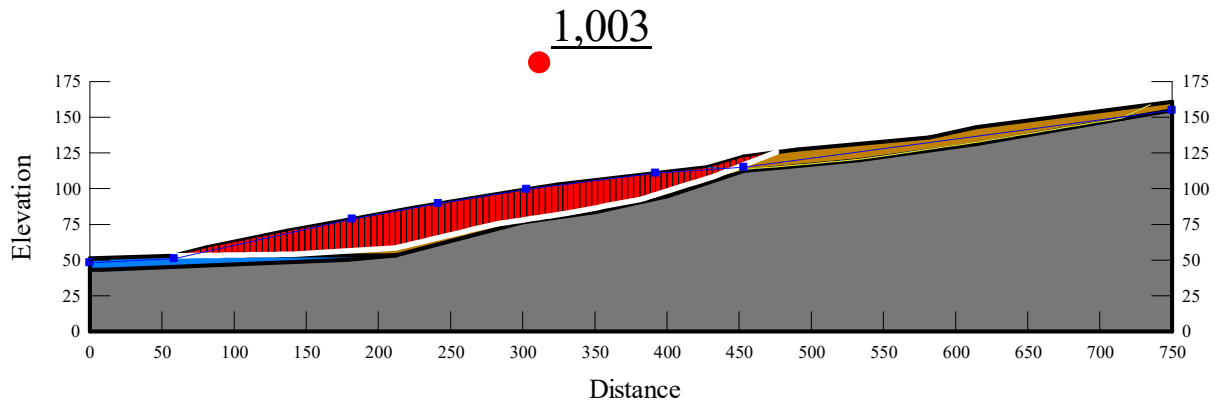


Figura 2-37 – Falda massima + $\phi'_r = 17^\circ$. Cinematismo principale

- b) un cinematismo che coinvolge sia il cinematismo principale che il secondario (nel modello esteso verso monte fino alla verticale S2) raggiunge la condizione di instabilità incipiente ($FS \approx 1$) per valori di attrito residuo (ϕ'_r) di poco superiori a 14°.

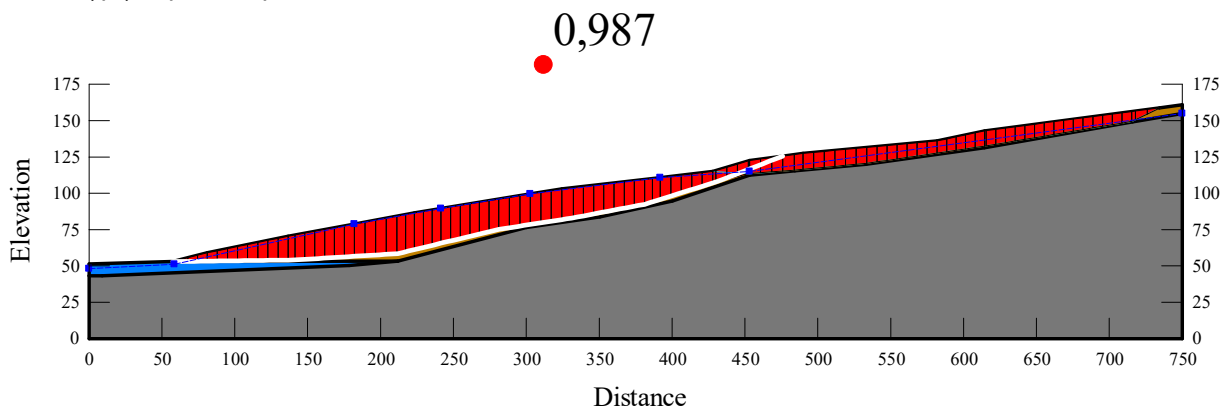


Figura 2-38 – Falda massima + $\phi'_r = 14^\circ$. Cinematismo principale+secondario

Le analisi permettono dunque di individuare un campo di variabilità dell'angolo di attrito residuo che è pienamente congruente con i valori del parametro determinati sperimentalmente, ed indirettamente giustificano la cinematica del fenomeno ipotizzata negli schemi.

In particolare, l'adozione dell'angolo di attrito residuo minimo (ϕ'_r) di 14° consente di giustificare la progressione del fenomeno registrata da alcuni strumenti

APPALTATORE: Consorzio Soci HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: Mandataria Mandanti ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ RH	DOCUMENTO OC0101 281	REV. A	FOGLIO 35 di 35
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE						

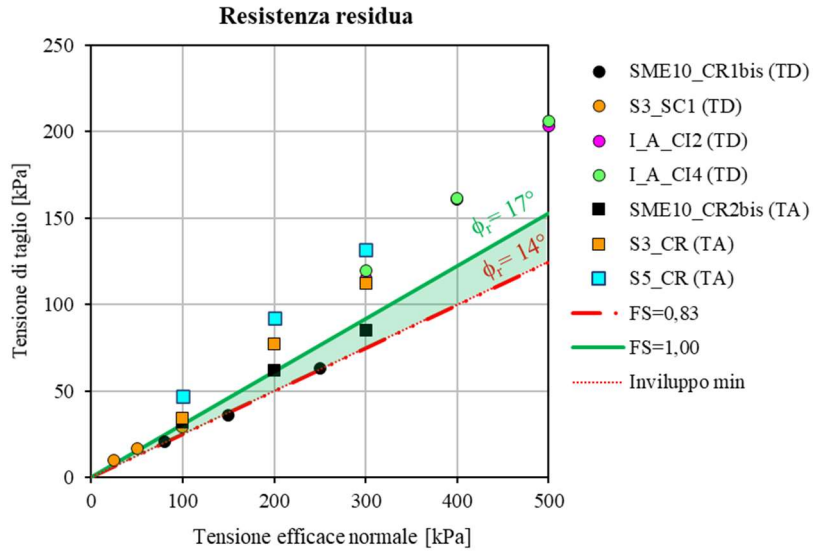


Figura 2-39 – risultati delle analisi di sensibilità per la superficie di ipotesi 2



CONSORZIO HIRPINIA – AV

*Analisi dei dati di monitoraggio del versante
in sinistra idrografica del Fiume Ufita.
Galleria Melito e le opere di fondazione del Viadotto VI03
Tratta all'aperto Castel del Fiego, da pk 9+550 a pk 10+090*



Consulenti tecnici: Dott. Ing. David Segato
Dott. Ing. Alessandro Vita
Consulente scientifico: Prof. Giuseppe Scarpelli

Il Responsabile Scientifico

Prof. Giuseppe Scarpelli

Il Direttore Tecnico GES

Ing. David Segato

Ns.RIF.	Revisione	Data
2021-HRP_2	EMISSIONE	15-04-2022



Sommario

1	PREMESSA	3
2	INDAGINI NEL SOTTOSUOLO: DALLE INDAGINI DEL P.D. ALLE INTEGRAZIONI DEL P.E.D.	4
2.1	MISURE INCLINOMETRICHE.....	5
2.1.1	<i>I primi dati inclinometrici: 2020-2021</i>	5
2.1.2	<i>Misure inclinometriche nel corso del PED: 2021-2022</i>	8
2.2	PROVE DI PERMEABILITA' E MISURE PIEZOMETRICHE NEL CORSO DEL P.E.D.....	12
2.2.1	<i>Permeabilità da prove in foro</i>	12
2.2.2	<i>Monitoraggio piezometrico</i>	14
2.3	RISULTATI DI INDAGINI GEOFISICHE	16
3	REVISIONE DEL MODELLO GEOTECNICO	17
3.1	INDICAZIONI STRATIGRAFICHE DAI SONDAGGI	18
3.2	PROVE DILATOMETRICHE	21
3.2.1	<i>Modalità di elaborazione della prova</i>	21
3.2.2	<i>Risultati in termini di indice di spinta orizzontale K_D</i>	22
3.3	PROPRIETÀ GEOTECNICHE DEI TERRENI	24
3.3.1	<i>Caratteristiche fisiche e parametri di stato</i>	24
3.3.2	<i>Caratteristiche di resistenza in tensioni efficaci</i>	28
3.3.3	<i>Permeabilità</i>	32
4	PIOGGE E MOVIMENTI DI VERSANTE	34
4.1	PLUVIOMETRIA E CONFRONTO CON GLI SPOSTAMENTI OSSERVATI.....	34
4.2	MODELLO GEOMETRICO ED IDRAULICO DEL CORPO DI FRANA.....	36
4.3	ANALISI A RITROSO DEL MECCANISMO DI FRANA E PARAMETRI GEOTECNICI	38
5	CONCLUSIONI	41



1 PREMESSA

Il Consorzio Hirpinia – AV è attualmente impegnato nella fase di progettazione esecutiva di dettaglio della linea Alta Velocità Napoli-Bari I° lotto funzionale Apice-Hirpinia, in particolare delle opere di stabilizzazione degli scavi per l'imbocco lato Napoli della galleria Melito e di quelle di fondazione del viadotto VI03 di accesso alla galleria. Le opere ricadono lungo il versante in sinistra idrografica del fiume Ufita.

Il monitoraggio del versante ha messo in evidenza la presenza di un importante movimento franoso che interagisce con le strutture all'imbocco, i relativi piazzali, e le fondazioni della spalla e delle pile 1, 2 e 3 del viadotto.

Allo scopo di valutare le conseguenze progettuali e come integrare le opere di presidio a garanzia della sicurezza dell'infrastruttura, il Consorzio Hirpinia AV ha richiesto alla scrivente GES-Geotechnical Engineering Service una consulenza geotecnica specialistica finalizzata alla revisione del modello geotecnico di riferimento del versante, sulla base del quadro delle indagini esistenti e dei risultati della campagna di indagine integrativa comprendente ulteriori prove in sito e di laboratorio, nonché nuove attività di monitoraggio.

Le indagini e le analisi svolte hanno consentito di aggiornare il quadro sperimentale e di definire un nuovo modello geotecnico di riferimento del versante, risultato della integrazione di tutte le informazioni di carattere geologico e geotecnico disponibili. Emerge la necessità di una modifica sostanziale del precedente modello, sia in termini di geometria del dissesto, sia del quadro dei parametri geotecnici, modifica che viene esposta nella presente relazione di sintesi degli studi svolti

2 INDAGINI NEL SOTTOSUOLO: DALLE INDAGINI DEL P.D. ALLE INTEGRAZIONI DEL P.E.D.

Il quadro sperimentale oggi disponibile è il risultato della integrazione di tutte le indagini che si sono articolate dal 2015 ad oggi nel corso delle varie fasi progettuali per ampliare progressivamente l'area di studio lungo il tracciato ed a monte del portale di imbocco della galleria Melito.

Partendo dalle evidenze cinematiche rilevate dalla strumentazione inclinometrica installata in P.D. e P.E. fra dicembre 2020 e gennaio 2021, le indagini integrative di P.E.D. sono state pianificate con i seguenti obiettivi:

- estendere la rete di inclinometri a monte dell'imbocco della GA04 per perimetrare l'area di dissesto e stabilirne la profondità (FASE1 PED);
- caratterizzare la geometria del movimento nell'area del viadotto, per identificare i limiti del cinematisimo al piede del versante (FASE2 PED);
- definire le quote piezometriche lungo il versante e in corrispondenza delle superfici di scorrimento individuate (FASE2 PED);
- estendere le informazioni di carattere puntuale ottenute con indagini intrusive attraverso rilievi lineari di tipo geofisico (FASE3 PED).

La planimetria di Figura 2-1 fornisce il quadro di insieme delle indagini eseguite nell'area a partire da quelle per il PD.

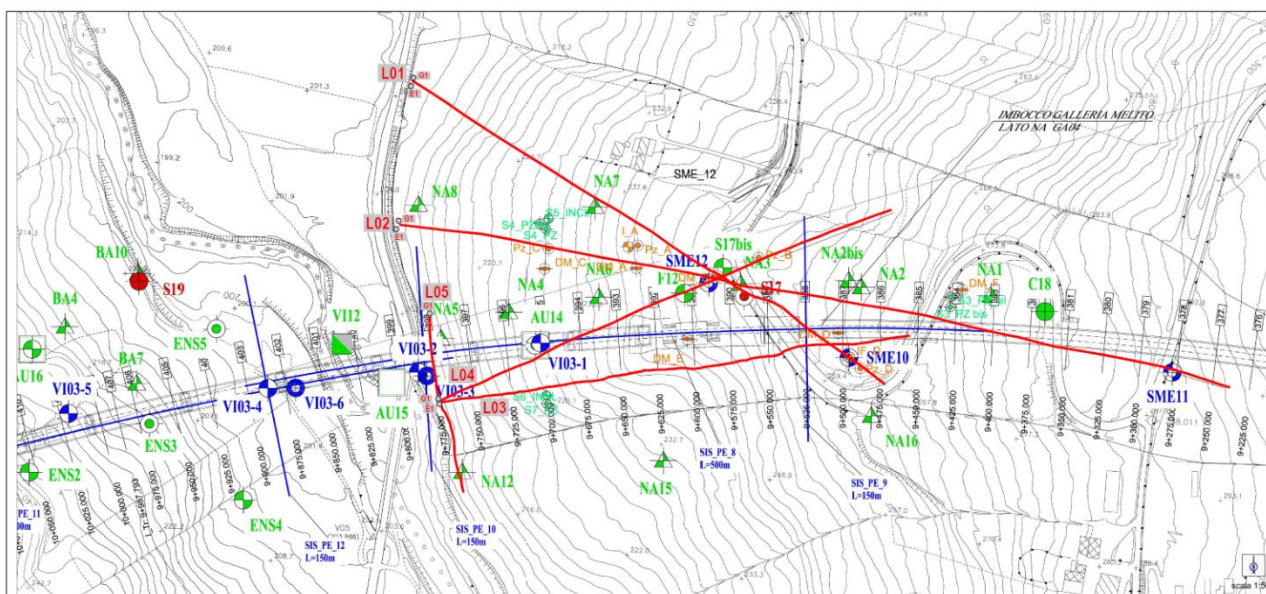


Figura 2-1 - Planimetria indagini completa (PD, PE, FASE 1 PED, FASE 2 PED, FASE 3 PED)

2.1 MISURE INCLINOMETRICHE

2.1.1 I primi dati inclinometrici: 2020-2021

Il quadro attualmente delineato dal complesso delle misure inclinometriche disponibili consente di identificare la presenza di un movimento di versante lento e profondo, orientato in direzione ovest, che interferisce con le opere in corso di realizzazione.

Prendendo a riferimento le ubicazioni delle indagini riportate in Figura 2-1, i primi dati che indicano la presenza di un dissesto profondo risalgono alla fine del 2020, quando si è reso chiaramente evidente un movimento profondo nei pressi dell'imbocco della GN04 in corrispondenza delle verticali S17bis (spostamento localizzato a -21m da p.c.), F12 (-21m da p.c.) e SME12 (-18m da p.c.), con azimuth compreso fra 270 e 300°N (Figura 2-2).

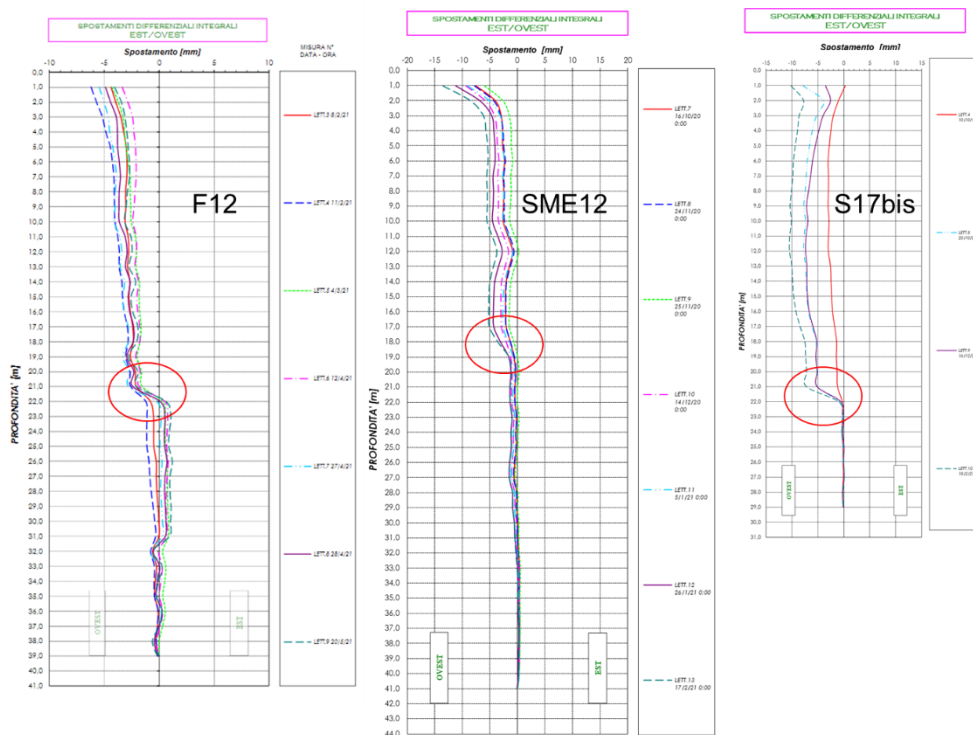


Figura 2-2 – Profili inclinometrici nel piano est.-ovest per le verticali S17bis, F12 e SME12: sono evidenziate le profondità dove si localizzano gli spostamenti

I movimenti rilevati sono coerenti in termini di azimuth e velocità con il profilo inclinometrico SME10, relativo ad una verticale 100 metri più a monte, dove si ritrova la localizzazione degli spostamenti a circa 12m da p.c.. Inoltre, anche la verticale SME11 circa 200m a monte, indicava possibili scorrimenti localizzati a 5m da p.c., all'incirca in prossimità del passaggio fra i depositi più superficiali e la formazione (Figura 2-3).

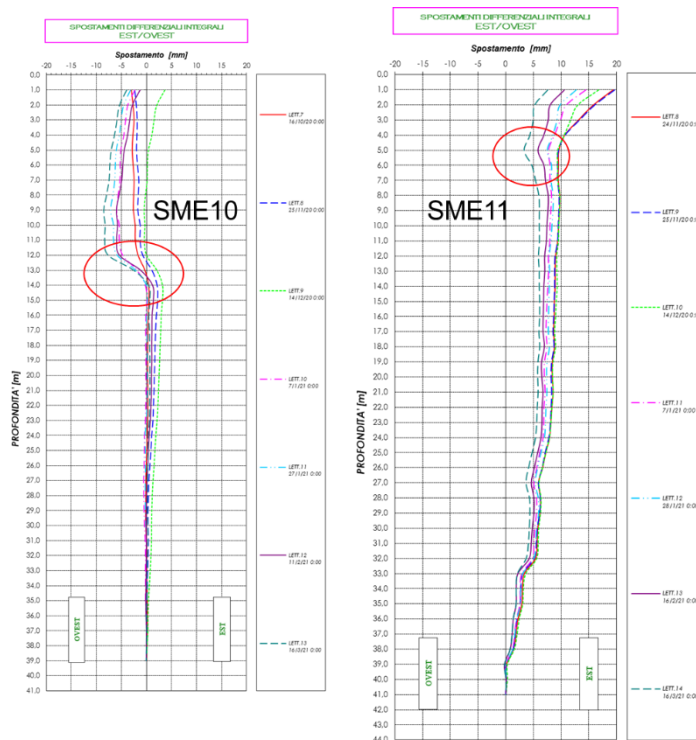


Figura 2-3 - Deformate inclinometriche est-ovest relative alle verticali SME10 e SME 11 con indicazione delle quote di possibile scorrimento

Per la zona del versante interagente con il viadotto VI03 la situazione è più complessa. Nel periodo che va dall'autunno del 2020 alla prima metà del 2021, le verticali di PE disponibili sono: la VI03-2bis posta al piede del versante e VI03-1bis collocata circa 80m a monte (Figura 2-4).

Se la verticale VI03-2bis consente di escludere la presenza di fenomeni profondi interferenti con le pile in alveo, l'interpretazione della verticale VI03-1bis, da cui risulterebbero movimenti in prossimità del fondo foro, è dubbia in quanto, terminando la guida inclinometrica all'interno di un livello prevalentemente granulare, questa potrebbe riflettere gli effetti di una scarsa cementazione. Inoltre, l'ipotesi di scarsa significatività del dato di movimento indicato dallo strumento VI03-1 bis sembrerebbe confermata dalla non coerenza fra velocità registrata nel periodo dicembre 2020-febbraio 2021, inferiore a 0,3 mm/mese, e quella delle verticali più a monte che nello stesso periodo indicano valori di circa 1mm/mese (Figura 2-5).

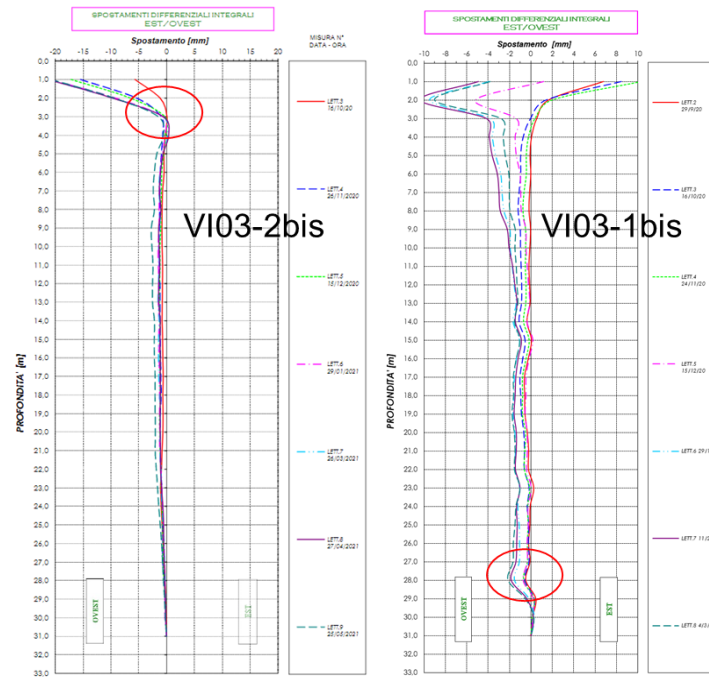


Figura 2-4 - Deformate inclinometriche est-ovest relative alle verticali VI03-2-bis e VI03-1bis con indicazione delle quote di possibile scorrimento

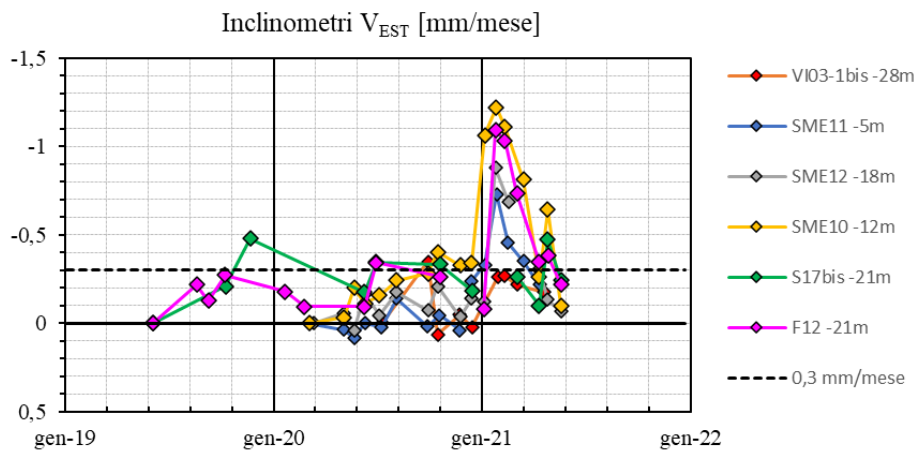


Figura 2-5 – velocità registrate alle quote di scorrimento per le verticali considerate.

2.1.2 Misure inclinometriche nel corso del PED: 2021-2022

I dati ottenuti dal monitoraggio a marzo 2021 non confermerebbero dunque il modello geotecnico interpretativo del versante adottato per il PE, in quanto la profondità dei movimenti osservati è ben maggiore dello spessore di 10 metri assunto per il dimensionamento delle fondazioni del viadotto ipotizzato in via cautelativa malgrado nelle prime fasi progettuali non fossero stati evidenziati fenomeni di dissesto in asse tracciato.

Per aggiornare il modello geotecnico di riferimento del progetto alle nuove evidenze, l'attuale fase progettuale di PED ha previsto di integrare il quadro sperimentale attraverso nuove verticali inclinometriche perseguendo due principali obiettivi:

- verificare l'estensione del fenomeno franoso per l'intero versante;
- accertare profondità e chiusura della superficie di rottura al piede.

A tale scopo, l'area di indagine è stata estesa verso monte, fino alla cresta del versante, dove è stata installata la verticale inclinometrica S1, mentre ulteriori inclinometri, S5 ed S6 intestati per oltre 30m nelle marne, consentono di verificare la attendibilità delle precedenti osservazioni (il profilo VI03-1bis) e la verticale IA è finalizzata alla ricerca di una possibile chiusura superficiale del cinematismo.

I profili inclinometrici incrementali disponibili fino a marzo 2022 sono illustrati in Figura 2-6 prendendo come riferimento di zero la lettura di settembre 2021. Con tale riferimento, si escludono i possibili errori sperimentali introdotti da una riparazione della sonda inclinometrica avvenuta ad agosto 2021.

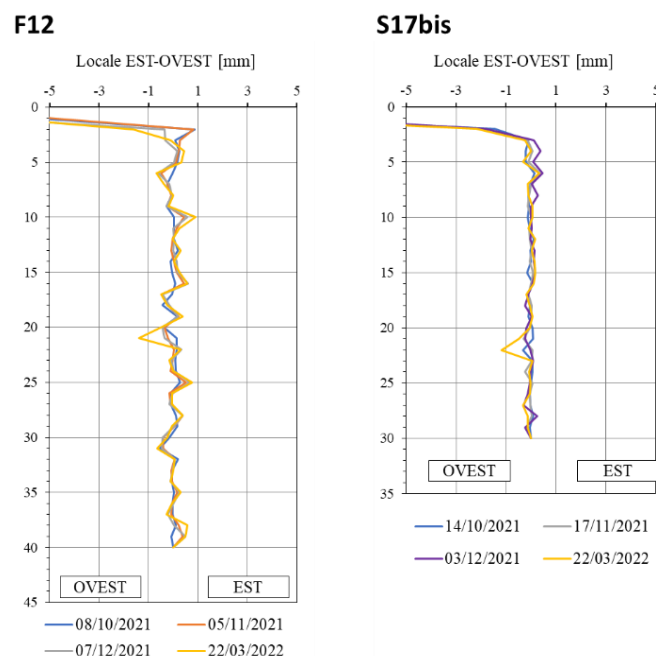


Figura 2-6 – Inclinometri PD. Spostamenti locali in direzione Est-Ovest.

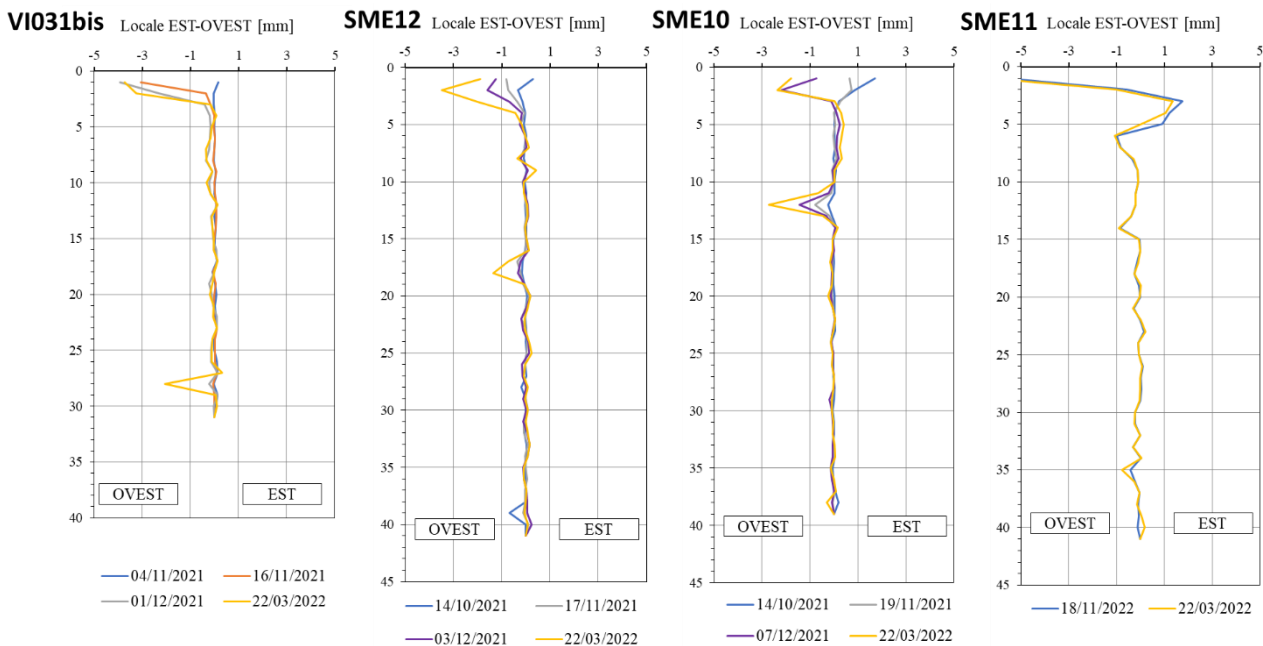


Figura 2-7 – Inclinometri PE. Spostamenti locali in direzione Est-Ovest.

Fra le letture di dicembre 2021 e marzo 2022 tutte le verticali hanno messo in evidenza incrementi di spostamento dell'ordine di 1-2mm localizzati alle medesime quote che si potevano individuare, seppure in modo meno evidente, già a inizio 2021 dai profili inclinometrici di PD e PE.

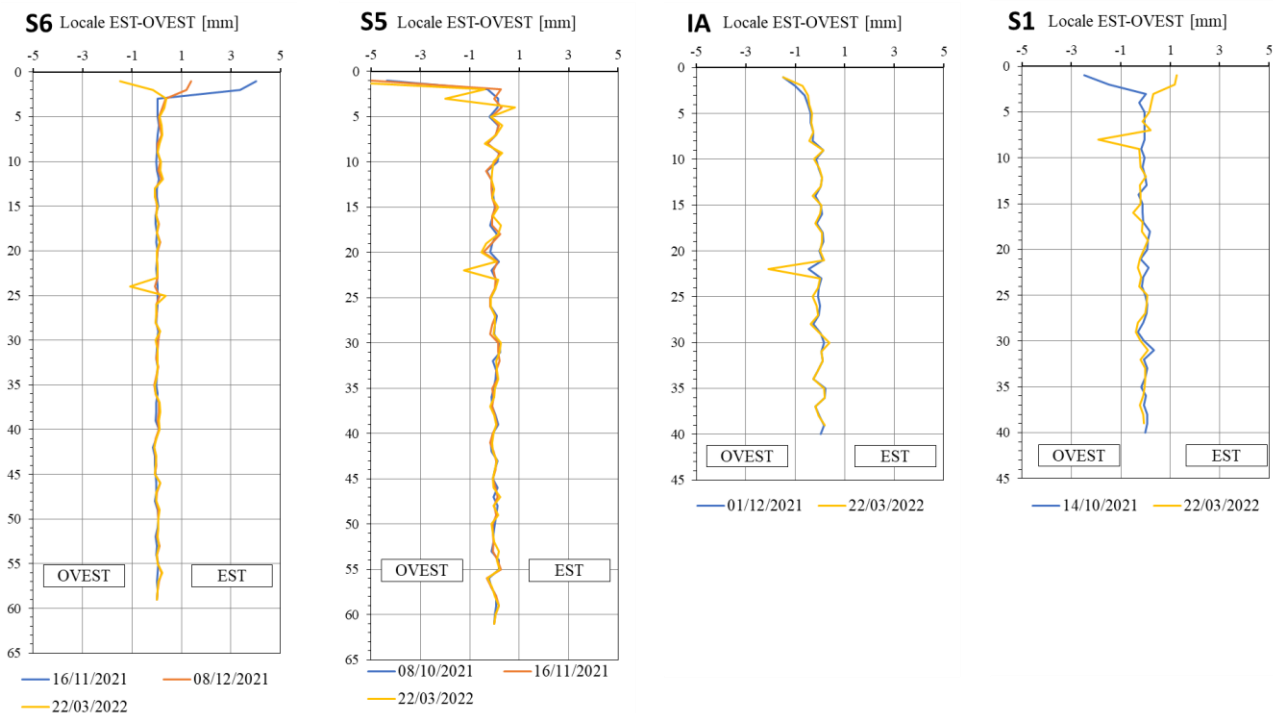


Figura 2-8 – Inclinometri PED. Spostamenti locali in direzione Est-Ovest.

Il quadro sperimentale che emerge dalle nuove osservazioni delinea la presenza di un cinematismo di frana profonda, che si estende a monte e a valle della zona di imbocco Nord della galleria GV4, con profondità di circa 20÷22 m nella porzione inferiore del versante e di circa 6÷10 m verso monte.

La traccia della superficie di scorrimento è delineata in Figura 2-9, in base alle profondità dove si localizzano gli spostamenti lungo i profili inclinometrici sia incrementali che integrali.

In Figura 2-10 sono invece illustrati gli andamenti nel tempo degli spostamenti alle rispettive profondità dove sono localizzati. La velocità media di spostamento è modesta, dell'ordine dei 5mm/anno per la verticale SME10, con punte massime di 10÷15 mm/anno nei periodi di maggiore attività.

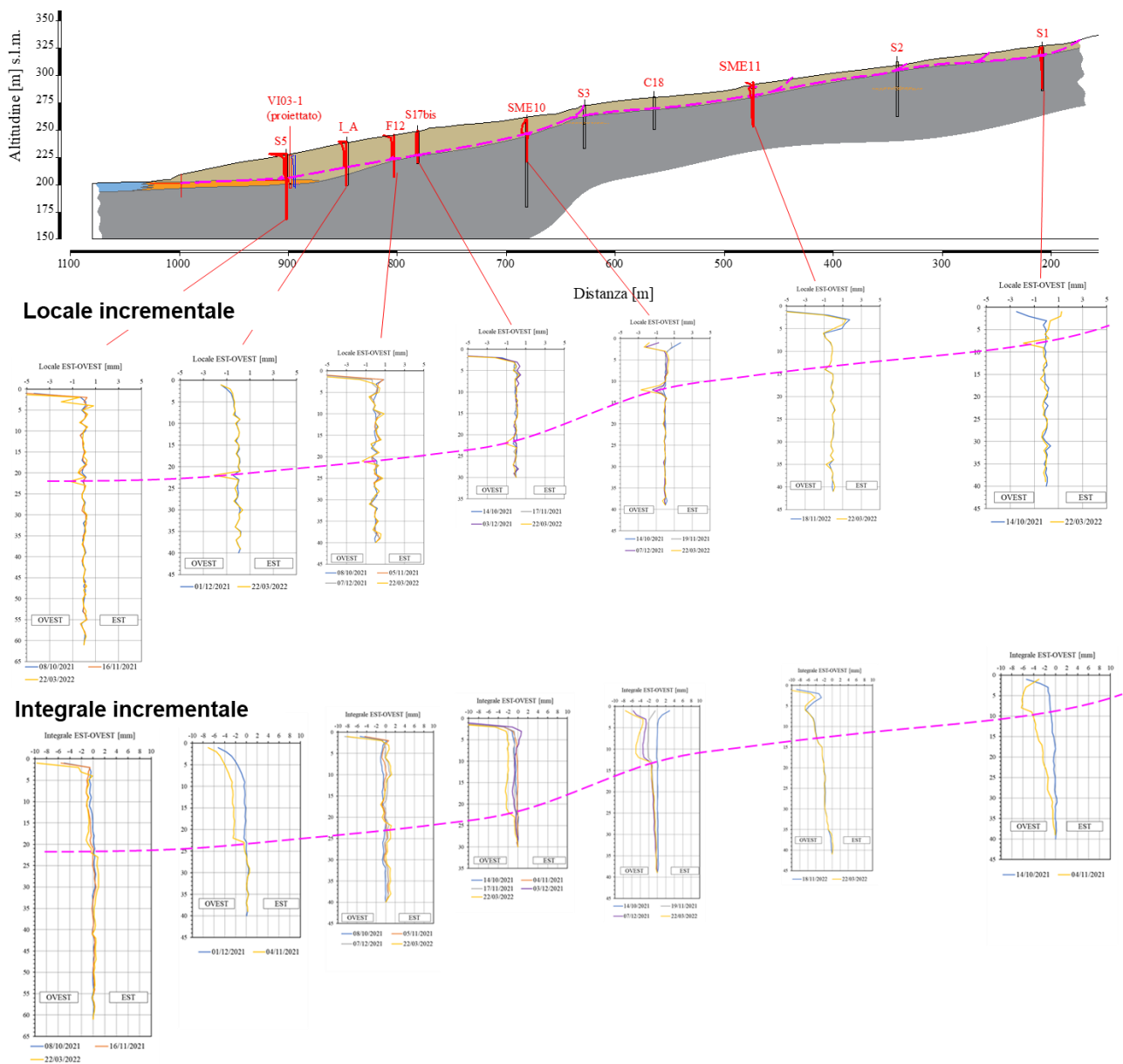


Figura 2-9 – Sezione B-B'. Profili inclinometrici incrementali in direzione Est-Ovest.

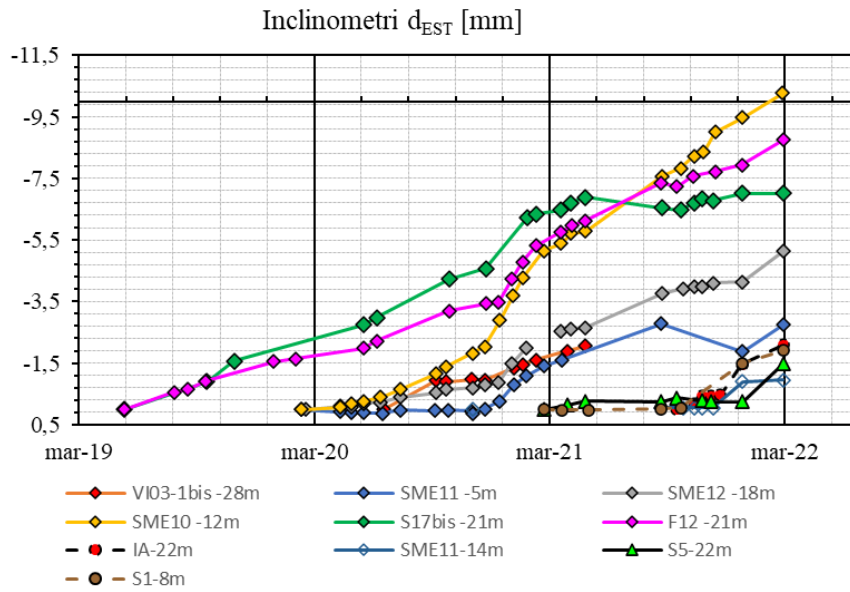


Figura 2-10 – Andamento nel tempo degli spostamenti inclinometrici alle profondità di scorrimento.

Dalle misure inclinometriche risulta in sostanza la presenza di un fenomeno di frana profonda che interessa l'intero versante, con superficie di rottura coincidente con il contatto fra la formazione superficiale di argille sabbiose e limose (BNA 1b in PD) e quella profonda, marnosa (BNA2 in PD).

2.2 PROVE DI PERMEABILITA' E MISURE PIEZOMETRICHE NEL CORSO DEL P.E.D.

2.2.1 Permeabilità da prove in foro

Nel corso delle fasi 1 e 2 della campagna indagine integrativa di P.E.D, sono state realizzate prove di permeabilità in foro tipo “Lefranc”: tali prove permettono di indagare volumi di terreno decisamente maggiori rispetto a quelli investigabili con prove di laboratorio consentendo di stimare valori di conducibilità idraulica riferibili alla scala del deposito.

Nello specifico, gli spessori dei tratti di prova (L) vanno da un minimo di 0,5 m ad un massimo di 2 m, con un diametro (d) di perforazione di 0,127 m; in genere si assume che per $L/d > 1,2$, il valore di permeabilità stimato sia quello orizzontale (k_h). Dato che per tutte le prove eseguite la geometria della tasca di prova supera ampiamente il rapporto di snellezza di 1,2, i valori calcolati rappresentano la permeabilità orizzontale dei materiali indagati. Si sottolinea, inoltre, che tutte le prove sono state effettuate in abbassamento del livello dell'acqua all'interno del tubo, tranne le verticali Pz_A e Pz_B, nelle quali, in corrispondenza dei tratti di prova, il livello risaliva fino al piano campagna.

Partendo dai report delle prove, per ogni intervallo temporale, si è calcolato il coefficiente di permeabilità in accordo alle “Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche” (1977) a cura dell'Associazione Geotecnica Italiana:

$$k = \frac{A}{c_L \cdot (t_1 - t_2)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$$

dove:

k [m/s] è il coefficiente di permeabilità;

A [m²] è l'area di base del cilindro di prova;

h_1 e h_2 [m] sono le altezze dei livelli d'acqua nel foro rispetto al fondo stesso agli istanti t_1 e t_2 ;

t_1 e t_2 [s] sono i tempi ai quali si misurano h_1 e h_2 ;

c_L [m] è un coefficiente di forma dipendente dalla geometria della tasca di prova.

Nello specifico, se $L \gg d$ si assume $c_L = L$, mentre se $L \leq d$ si assume $c_L = 2\pi D + L$.

Per ogni prova, i valori di permeabilità determinanti per ogni step, sono stati opportunamente mediati al fine di ottenere un unico valore di permeabilità ritenuto rappresentativo. Si sottolinea, inoltre, che l'elaborazione delle prove è stata eseguita considerando la profondità del fondo foro (h_{ff}) come quota di riferimento secondo lo schema riportato in Figura 2-11.

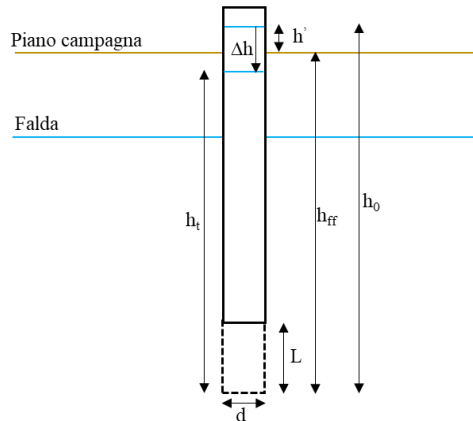


Figura 2-11 – Schema interpretativo della prova Lefranc

Nella seguente Tabella 1 sono riassunti i risultati delle prove eseguite.

Tabella 1 – Prove Lefranc. Sintesi delle caratteristiche di prova e dei relativi risultati

Sondaggio	Quota [m s.l.m.]	Prof. del tratto indagato [m] da p.c.		Modalità della prova		Permeabilità [m/s]	Note	
		da	a	In abbassamento	In risalita			
S2	312,5	12	14	×		3,5E-10	-	
		2,4	3	×		4,7E-06	Eseguita su materiale superficiale molto "allentato"	
		9	11	×		8,3E-10	-	
S3	273,0	2,2	3	×		1,0E-05	Eseguita su materiale di riporto	
		10,5	12	×		8,0E-09	-	
		16	16,8	×		5,3E-06	Eseguita su livello grossolano	
S5	228,3	6,5	7	×		1,2E-08	-	
		14	15	×		3,4E-09	-	
S6	225,5	5	6	×		1,8E-09	-	
		24	25	×		2,7E-07	Eseguita su orizzonte drenante	
PED	Pz_A	240,4	13	14		×	2,2E-07	-
	Pz_B	249,1	18	19		×	3,8E-07	-
	Pz_C	228,2	18	19	×		8,2E-07	-
	Pz_D	259,7	8	9	×		5,6E-08	-

Sulla base dei risultati si può affermare che i valori del coefficiente di permeabilità (orizzontale) dell'ordine per i depositi profondi, sono dell'ordine di $10^{-9} \div 10^{-10}$ m/s. Peraltro, quando la prova ha interessato i livelli di materiale grossolano, la permeabilità cresce considerevolmente con valori di k dell'ordine di 10^{-6} m/s.

Per quanto riguarda i depositi superficiali, i valori di permeabilità risultano più dispersi e maggiori dei precedenti, un range compreso indicativamente tra $10^{-7} \div 10^{-9}$ m/s. I valori più elevati, superiori a 10^{-7} m/s, sono stati registrati per le verticali Pz_A, Pz_B e Pz_C per i quali, i relativi tratti di prova ricadono in corrispondenza della posizione della superficie di scorrimento (rilevata o presunta). Ciò sembrerebbe indicare come quest'ultima, caratterizzata da una struttura più "aperta" rispetto al materiale circostante intatto, possa rappresentare una fascia a maggiore permeabilità, ovvero una via preferenziale per la circolazione delle acque del sottosuolo.

Nella zona del piede del versante, si è riconosciuta la presenza di un livello granulare evidentemente da interpretarsi come l'estensione dell'alveo del fiume Ufita. L'unica prova Lefranc che ha interessato questo deposito ha restituito per la permeabilità k il valore di circa 3×10^{-7} m/s.

2.2.2 Monitoraggio piezometrico

Le verticali di monitoraggio piezometrico disponibili per P.D. e P.E. erano: VI03-3, AU14 e S17. Le misure piezometriche non consentivano di stabilire una ricostruzione affidabile dell'idraulica del sottosuolo ed in fase di PED si è ritenuto opportuno integrare le indagini con nuovi e più numerosi strumenti.

Sono state in particolare realizzate verticali piezometriche di tipo Norton (S4, S4bis, S7) e a cella di Casagrande (S2, S2bis, S3, S3bis, PzA, PzB, PzC e PzD), con sensori collocati in prossimità della superficie di scorrimento ipotizzata (PzC e PzD) ed al di sopra di essa, nonché è stata incrementata la frequenza delle misure.

Le nuove misure piezometriche, sintetizzate in Figura 2-12, mettono in luce i seguenti aspetti:

- nella parte bassa del pendio, all'interno del corpo di frana, il livello freatico rimane sempre prossimo al p.c. mentre al di sotto della presunta superficie di scorrimento il livello rimane più basso, circa 20m da p.c.;
- la cella PzC posta poco al di sopra della superficie di scorrimento ipotizzata (20m da p.c.) registra una forte escursione in corrispondenza dei periodi di precipitazione più intensa, sollevandosi da circa -20m fino a p.c., fra l'inizio di novembre e l'inizio di dicembre 2021. Lo strumento sembra infatti influenzato dalla presenza del sottostante livello granulare posto a circa 24m da p.c.;
- l'andamento delle quote piezometriche rilevato dagli strumenti al piede del pendio è in generale correlabile con quello delle precipitazioni cumulate a 60 giorni. Tale correlazione risulta meno evidente per i piezometri a monte.

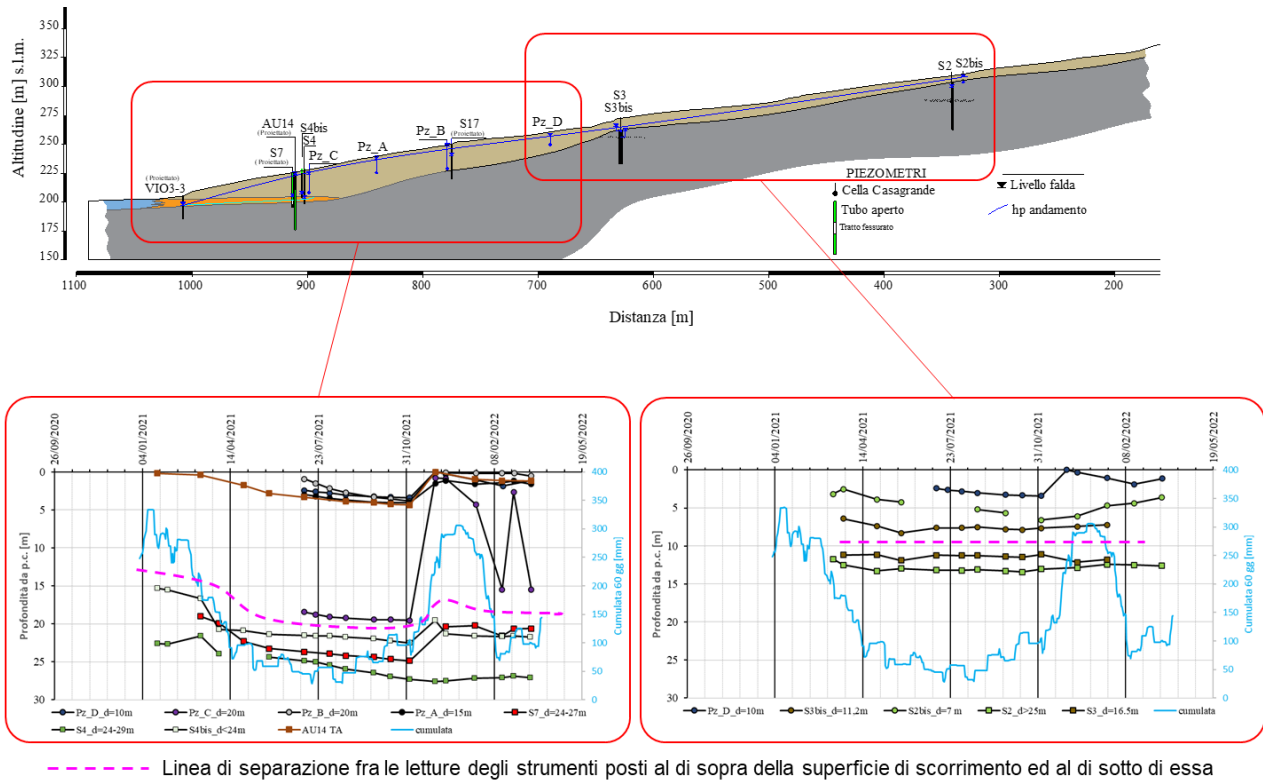


Figura 2-12 – misure piezometriche campagna integrativa di PED

Il dato sulla presenza di livelli freatici prossimi al p.c. all'interno del volume di terreno soggetto a dissesto risulta in pieno accordo con la presenza di zone umide in corrispondenza della stazione di sondaggio B e con la presenza di un pozzo con livello a p.c. nei pressi del sondaggio stesso (Figura 2-13).

Si segnala inoltre che la prova di permeabilità in foro eseguita proprio sulla verticale Pz_B ad una profondità di circa 18-19m registrava un livello piezometrico superiore al p.c. tanto da dover eseguire la prova con flusso idraulico in risalita.

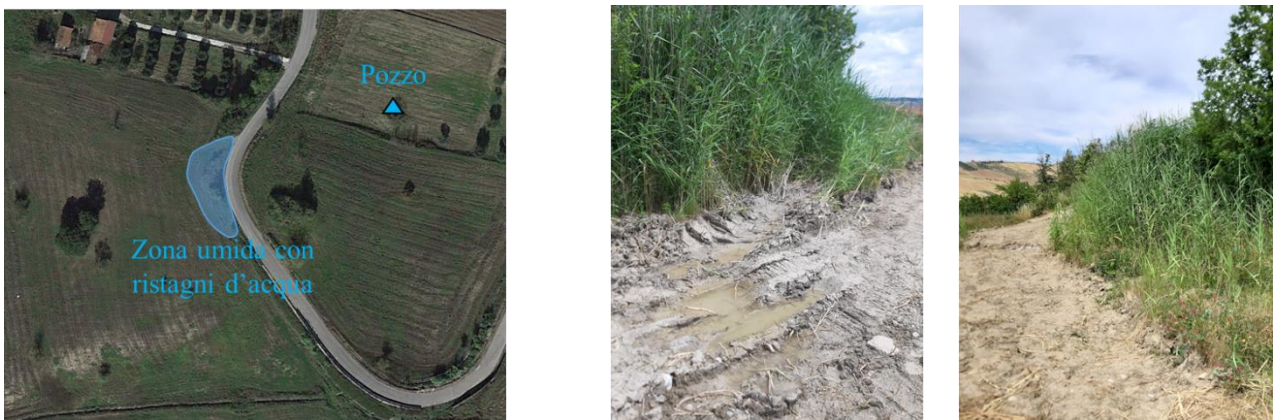


Foto scattate il 14-06-2021

Figura 2-13 – Zone di ristagno osservabili in corrispondenza della stazione di indagine B e ubicazione del pozzo con acqua a piano campagna

2.3 RISULTATI DI INDAGINI GEOFISICHE

Le indagini sismiche a rifrazione eseguite in fase di PED e presentate nel report interpretativo prodotto dalla società AKRON¹ e negli elaborati ad esso allegati, forniscono risultati coerenti con quelli presentati ai paragrafi precedenti lungo i profili di indagine considerati. Nel seguito viene preso in considerazione il profilo L2 coincidente con la sezione B-B' orientata secondo l'azimut del movimento.

In Figura 2-14 si riporta la sovrapposizione fra la mappa a colori del gradiente di velocità delle onde di compressione (V_p) e la posizione della superficie di scorrimento individuata dagli inclinometri.

Il lineamento nero indica la superficie di maggior gradiente ovvero il passaggio fra i materiali superficiali e la formazione; tale lineamento coincide sia con il contatto fra le formazioni che risulta dall'insieme dei sondaggi, sia con la superficie di rottura descritta dagli inclinometri.

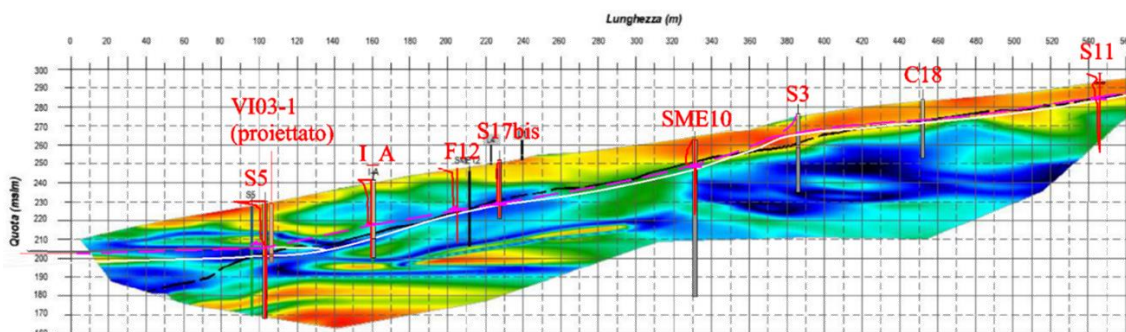


Figura 2-14 – Sezione L2: sovrapposizione fra le matrici del gradiente V_p e la posizione della superficie di scorrimento individuata dagli inclinometri (blu=0; Rosso=170)

Il profilo delle velocità delle onde di compressione V_p permette anche di individuare, seppure in forma qualitativa, la presenza di terreni saturi (sotto falda), per i quali V_p si pone tipicamente pari a 1500m/s.

Risulta interessante osservare come verso monte, coerentemente con quanto evidenziato dalle misure piezometriche, il livello freatico rimane al contatto fra le due unità, mentre verso valle risulta influenzato dalla presenza del livello granulare presente a quota circa 200m su l.m.m.

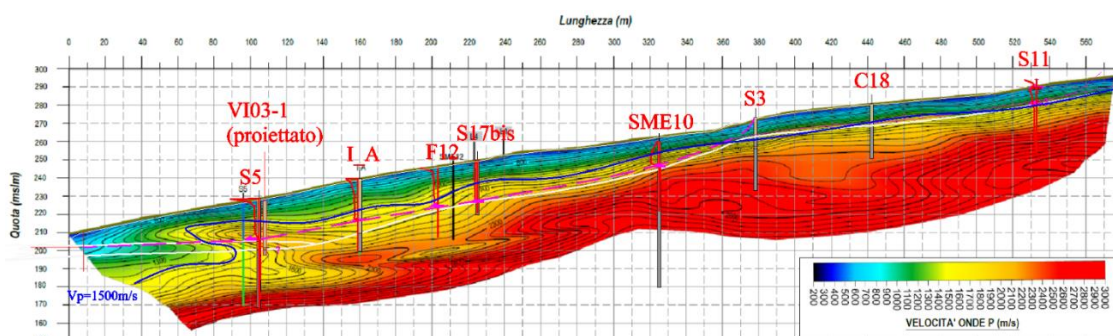


Figura 2-15 – Sezione L2: sovrapposizione fra le matrici del gradiente V_p e la posizione della superficie di scorrimento individuata dagli inclinometri

¹ AKRON - Itinerario Napoli-Bari: Raddoppio tratta Apice-Orsara I Lotto funzionale Apice Hirpinia. Indagini geofisiche su tracciato di progetto Apice VI03



3 REVISIONE DEL MODELLO GEOTECNICO

Le indagini integrative di PED hanno evidenziato la presenza di dissesti attivi e profondi lungo il versante ove ricade l'imbocco lato Napoli della Galleria Melito.

I caratteri cinematici dei dissesti emergono dalle osservazioni inclinometriche e dai profili sismici che sono risultati fra loro congruenti. L'approfondimento di indagine con ulteriori carotaggi, prove in sito e di laboratorio e monitoraggi, ha permesso un significativo miglioramento del quadro di conoscenza su proprietà geotecniche dei terreni e caratteristiche idrauliche del sottosuolo.

A seguito delle nuove conoscenze acquisite, viene nel seguito elaborata una revisione del modello geotecnico del versante, da assumere come riferimento per l'analisi dei cinematismi e per la definizione delle opere di stabilizzazione.

Il nuovo modello geotecnico di riferimento si basa su una diversa articolazione del modello stratigrafico rispetto a quella iniziale, per la necessità di accorpate i depositi interessati dai cinematismi sulla base del comportamento meccanico ed idraulico piuttosto che della origine e classificazione geologica dei singoli depositi. A tal fine si è proceduto nel modo seguente:

- Identificazione di strati costituiti da materiali omogenei da un punto di vista granulometrico: stante la ricostruzione della successione litostratigrafica emersa dal quadro geologico, i terreni sono distinti in funzione della dimensione prevalente dei grani; si è proceduto pertanto a le unità prevalentemente grossolane laddove rilevanti in termini idraulici o meccanici, dalle unità a carattere marcatamente coesivo;
- Ulteriore suddivisione, all'interno del medesimo gruppo in unità geotecniche al differente comportamento meccanico espresso nel corso delle prove in situ (pocket e DMT);
- Elaborazione dei risultati dalle prove di laboratorio analizzando separatamente tutte le determinazioni provenienti dai campioni prelevati entro la medesima unità geotecnica omogenea. Si è così finalizzata la caratterizzazione fisico-meccanica delle varie unità, cui corrispondono parametri geotecnici significativi.

3.1 INDICAZIONI STRATIGRAFICHE DAI SONDAGGI

Le stratigrafie dei sondaggi integrativi e le prove dilatometriche effettuate, mettono in luce da un lato una certa omogeneità granulometrica dei depositi indagati, a prevalenza limoso-argillosa, interrotta localmente da orizzonti più grossolani, e dall'altro una differenza nella risposta meccanica fra i depositi prevalentemente limosi mediamente consistenti più superficiali e quelli profondi marnosi caratterizzati da ottime proprietà meccaniche ed elevata rigidezza.

Nella porzione di versante interessata dalle opere, tale netta separazione di comportamento meccanico si identifica con il passaggio della superficie di scorrimento che delimita il cinematismo, per come è stata rilevata dalle indagini in sito; ai depositi superficiali è stata attribuita un'unica unità geotecnica denominata UG1; ai depositi più profondi si è invece attribuita l'unità UG2 (Figura 3-1).

Con riferimento al modello geologico, l'Unità geotecnica UG1 è riconducibile alle porzioni più alterata, superficiale, della facies litologica BNA1b, mentre l'unità geotecnica UG2 rappresenta le porzioni più consistenti della facies litologica BNA1b, nonché il substrato più competente della facies litologica marnosa BNA2.

L'UG1 ha spessore variabile da circa 30m nella zona di valle (S5 ed S6, DM_A), a circa 15m verso metà pendio (DM_D), a 8÷10m nella porzione più a monte (S1, S2, DM_F). L'UG2, nel modello stratigrafico, può considerarsi indefinita.

Per entrambe le unità geotecniche considerate, le caratteristiche granulometriche indicano la presenza di una matrice pelitica in percentuali tali da condizionarne completamente il comportamento meccanico.

Sebbene meno compatti dei terreni più profondi, i materiali della UG1 sono comunque caratterizzati da buona consistenza risultando ad esempio i valori delle resistenze al penetrometro tascabile generalmente superiori a 2 kg/cm².

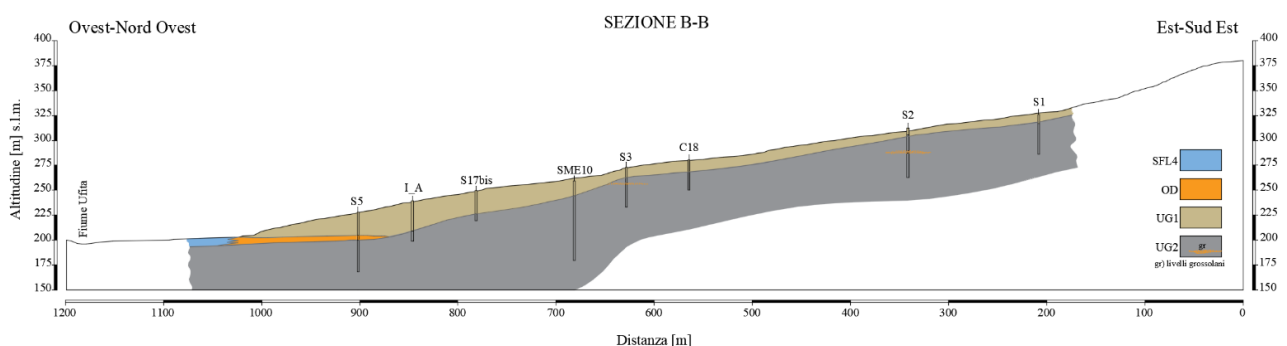


Figura 3-1 – Profilo delle unità geotecniche individuate



Nella zona di valle del versante, in tutte le verticali indagate (S5, S6 e VI03-1), fra le profondità di 25 e 28m (circa 200m l.m.m.) si ritrova un orizzonte di modesto spessore di terreno a granulometria più grossolana, ben evidenziato anche dalla perdita totale e prolungata del fluido di perforazione registrata (VI03-1) a quote corrispondenti a quelle del fondo valle, durante la perforazione. Il monitoraggio piezometrico mediante celle di Casagrande e piezometri a tubo aperto che attraversano lo strato, conferma come questo orizzonte costituisca un vero e proprio contorno drenante, come dimostrato dal brusco abbassamento della quota piezometrica che si osserva al piede del versante nei periodi caratterizzati da scarse precipitazioni. A tale orizzonte drenante è stata associata una specifica unità geotecnica, denominata OD in Figura 3-1. Nel modello geologico tale orizzonte costituisce la porzione di base della facies BNA1b, caratterizzata da granulometria appunto più grossolana.

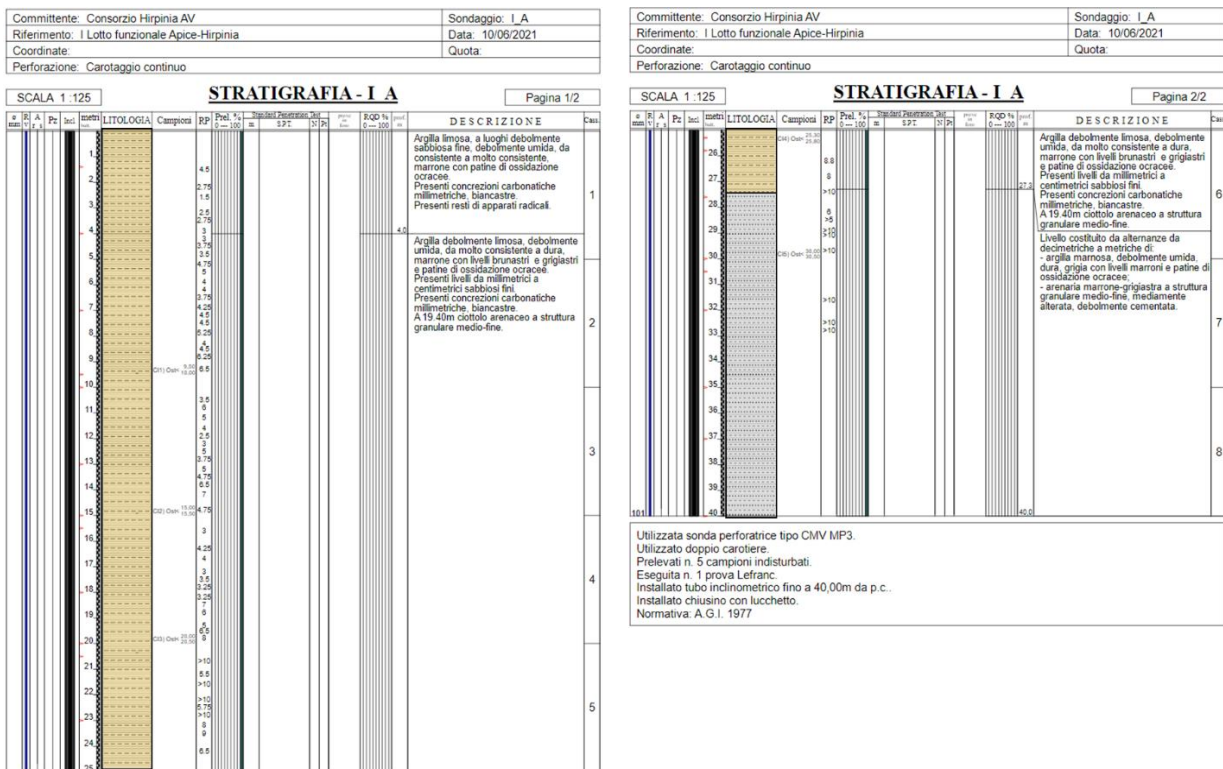


Figura 3-2 – Stratigrafia della verticale I_A

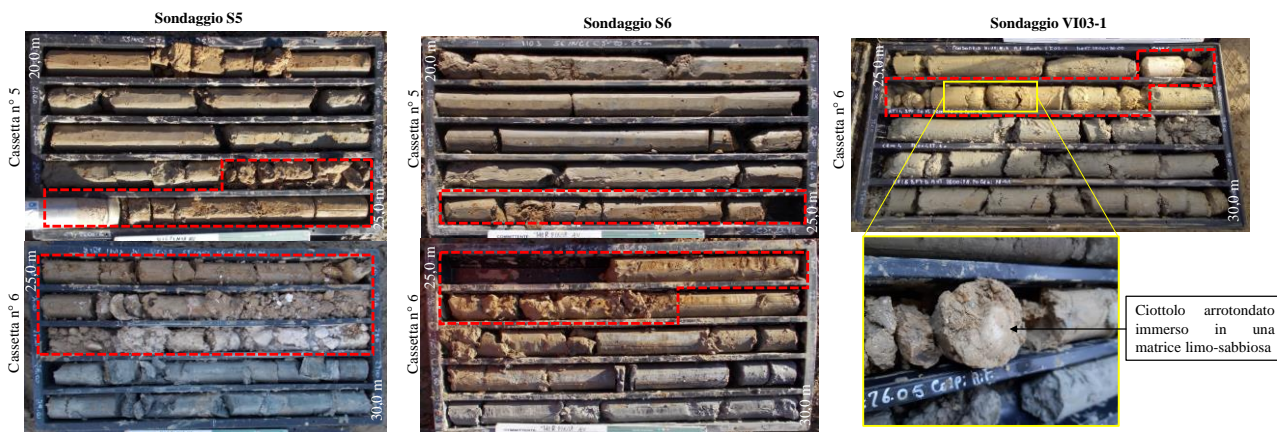


Figura 3-3 – Posizione del livello drenante lungo le verticali di sondaggio S5, S6 e VI03-1

Orizzonti granulari localizzati sono stati rinvenuti nel corso dei sondaggi di P.E.D anche nella zona a monte dell'imbocco all'interno dell'unità geotecnica profonda UG2 ed in particolare:

- S2: da 22,8 a 25,5 m da p.c. (dal report della scheda di sondaggio si segnala perdita di fluido di circolazione);
- S3: da 15,8 a 17,2 m da p.c. (in tale orizzonte è stata realizzata una prova Lefranc che ha restituito un valore elevato di permeabilità).

Si sottolinea che tali intervalli, da un punto di vista granulometrico e di plasticità, sono sensibilmente differenti dal materiale a grana fine che costituisce l'unità geotecnica di riferimento (campioni rimaneggiati S2_CR3 ed S3_CR4).



Figura 3-4 – Posizione dei livelli granulari all'interno dell'UG2 nelle verticali di sondaggio S3 e S2

3.2 PROVE DILATOMETRICHE

3.2.1 Modalità di elaborazione della prova

La prova dilatometrica (nel seguito denominate DM) consente di misurare due valori caratteristici di pressione, p_1 e p_0 , al variare della profondità da cui calcolare tre indici correlabili ai parametri geotecnici dei terreni. In particolare si definiscono

$$I_D = \frac{(p_1 - p_0)}{(p_0 - u_0)} \quad \text{Indice di materiale}$$

$$K_D = \frac{(p_0 - u_0)}{(\sigma'_{v0})} \quad \text{Indice di spinta orizzontale}$$

$$E_D = 34,7 \cdot (p_1 - p_0) \quad \text{Modulo Dilatometrico}$$

essendo u_0 la pressione interstiziale alla profondità di prova e da cui, con le correlazioni riportate nella letteratura specializzata (Comitato Tecnico TC16 ISSMGE, 2001) e riassunte in Tabella 2, si possono stimare i seguenti parametri geotecnici:

M	modulo edometrico	(terreni a grana fine o incoerenti)
c_u	resistenza al taglio non drenata	(terreni a grana fine)
K_0	coefficiente di spinta a riposo	(terreni a grana fine)
OCR	grado di sovraconsolidazione	(terreni a grana fine)
ϕ'	angolo di resistenza al taglio	(terreni incoerenti)

In tema di affidabilità, la stima di modulo edometrico (M) e della resistenza non drenata (c_u) presenta incertezze minori rispetto a quella dell'angolo d'attrito.

Tabella 2 - Formule base per l'elaborazione delle prove DMT (TC16 2001)

SIMBOLO	DESCRIZIONE	FORMULE BASE DI ELABORAZIONE DMT
p_0	Prima Lettura Corretta	$p_0 = 1.05 (A - Z_M + \Delta A) - 0.05 (B - Z_M - \Delta B)$
p_1	Seconda Lettura Corretta	$p_1 = B - Z_M - \Delta B$
I_D	Indice di Materiale	$I_D = (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0)$
K_D	Indice di Spinta Orizzontale	$K_D = (p_0 - u_0) / \sigma'_{v0}$
E_D	Modulo Dilatometrico	$E_D = 34.7 (p_1 - p_0)$
K_0	Coeff. Spinta Orizz. in Sito	$K_{0,DMT} = (K_0 / 1.5)^{0.47} - 0.6$
OCR	Rapp. di Sovraconsolidazione	$OCR_{DMT} = (0.5 K_D)^{1.56}$
c_u	Res. al Taglio Non Drenata	$c_{u,DMT} = 0.22 \sigma'_{v0} (0.5 K_D)^{1.25}$
ϕ'	Angolo di Resistenza al Taglio	$\Phi_{sato,DMT} = 28^\circ + 14.6^\circ \log K_0 - 2.1^\circ \log^2 K_0$
c_h	Coeff. di Consolidazione	$c_{h,DMTA} \approx 7 \text{ cm}^2 / t_{18\%}$
k_h	Coeff. di Permeabilità	$k_h = c_h \gamma_w / M_h$ ($M_h = K_0 M_{DMT}$)
γ	Peso di Volume	(vedi grafico in TC16 2001)
M	Modulo Verticale Drenato Confinato	$M_{DMT} = R_M E_D$ se $I_D \leq 0.6$ $R_M = 0.14 + 2.36 \log K_D$ se $I_D \geq 3$ $R_M = 0.5 + 2 \log K_D$ se $0.6 < I_D < 3$ $R_M = R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \log K_D$ con $R_{M,0} = 0.14 + 0.15 (I_D - 0.6)$ se $K_D > 10$ $R_M = 0.32 + 2.18 \log K_D$ se $R_M < 0.85$ porre $R_M = 0.85$
u_0	Pressione Neutra di Equilibrio	$u_0 = p_2 - C - Z_M + \Delta A$

3.2.2 Risultati in termini di indice di spinta orizzontale K_D

La prova dilatometrica risulta particolarmente efficace per la ricostruzione della geometria di corpi di frana. Per un pendio in argille sovraconsolidate, infatti, la prova dilatometrica è in grado di identificare livelli di terreno rimaneggiato corrispondenti generalmente alle superfici di scivolamento attive o pregresse. La presenza di materiale rimaneggiato è indicata da valori dell'indice di spinta orizzontale K_D intorno a 2 o inferiori.

La buona consistenza dei depositi superficiali ha reso difficoltosa l'avanzamento del dilatometro, tanto che molto spesso, nei tratti di maggiore consistenza, si è dovuto ricorrere al preforo, con una riduzione dei tratti indagati rispetto al programma sperimentale. D'altra parte, l'elevata consistenza del materiale consente di evidenziare molto chiaramente l'attraversamento di livelli più deboli e poco consistenti.

In Figura 3-5 e Figura 3-6 si riportano i risultati delle prove dilatometriche eseguite nel corso delle indagini integrative, in termini di indice di spinta K_D ; i dati di prova sono stati elaborati assumendo per il calcolo di u_0 le quote piezometriche registrate nei piezometri prossimi alle verticali indagate. Le frecce rosse indicano i punti in cui l'indice di spinta K_D risulta inferiore o uguale a 2.

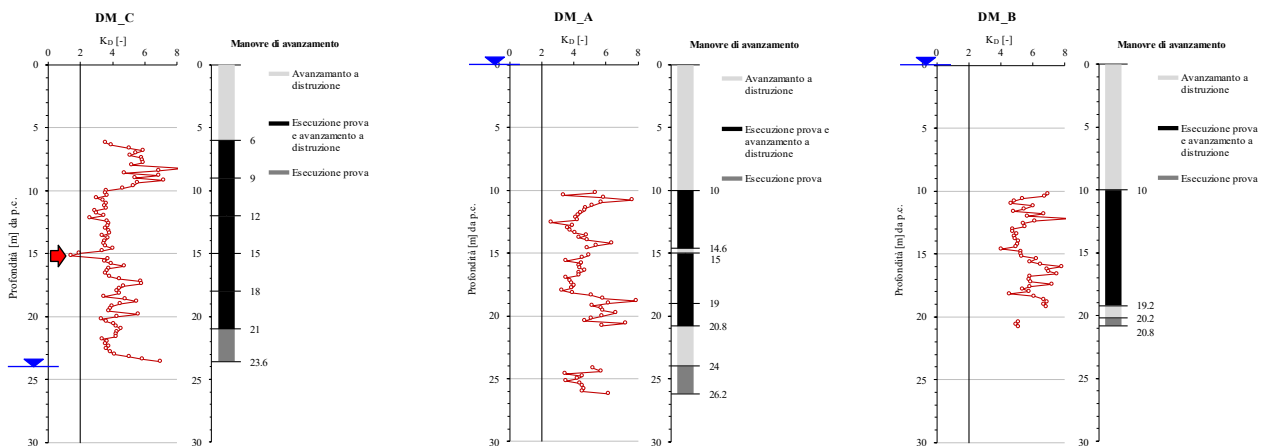


Figura 3-5 – DMT. Valori di K_D per le verticali C, A e B

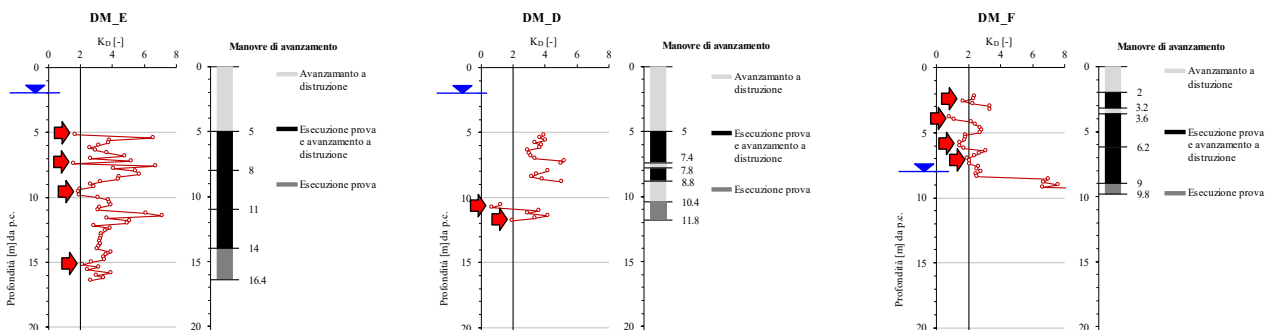


Figura 3-6 – DMT. Valori di K_D per le verticali E, D e F

Con riferimento ai risultati delle prove dilatometriche presentati in Figura 3-5 e Figura 3-6 si possono effettuare le seguenti osservazioni:

- lungo la verticale DM_A, alla profondità di 12 m da p.c. si registra una locale riduzione dell'indice KD, che testimonia la presenza di una fascia di debolezza, senza che venga però raggiunto il valore critico ($KD=2$).
- la verticale DM_D individua una fascia rimaneggiata a circa -11-12 m da p.c. coerente con la superficie individuata nel vicino inclinometro SME10.
- numerose zone di debolezza si evidenziano per la verticale DM_E ubicata al margine sud del movimento; tali zone ricadono nella porzione più superficiale del deposito, probabilmente ascrivibili all'evidente movimento che borda il pendio su quel lato (Figura 3-7).

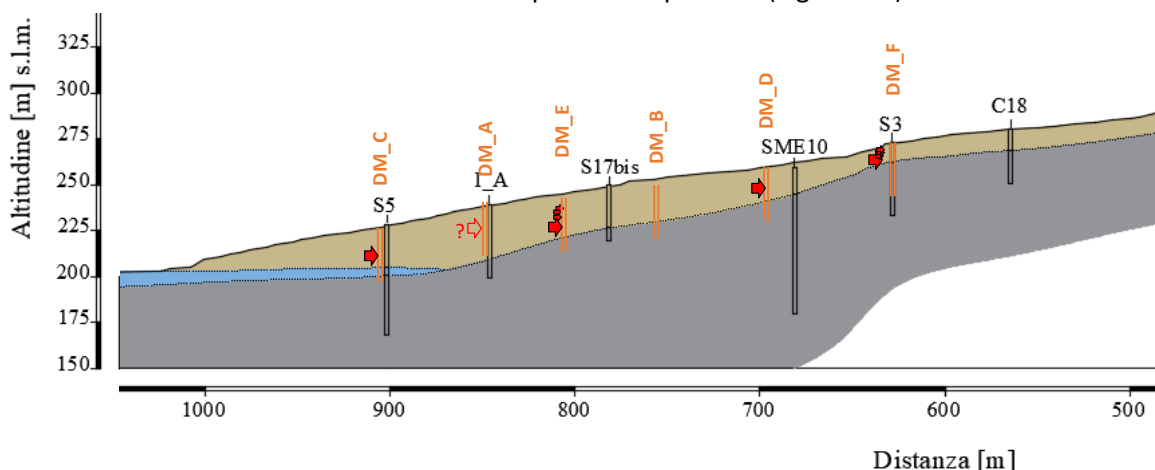


Figura 3-7 – Profilo della parte inferiore del versante con indicazione delle zone di debolezza rilevate dalle prove dilatometriche

Le prove DM permettono inoltre di stimare la resistenza non drenata c_u dei terreni; nel caso specifico, ciò è stato possibile solo all'interno della unità geotecnica UG1 (Figura 3-8), dove lo strumento poteva avanzare.

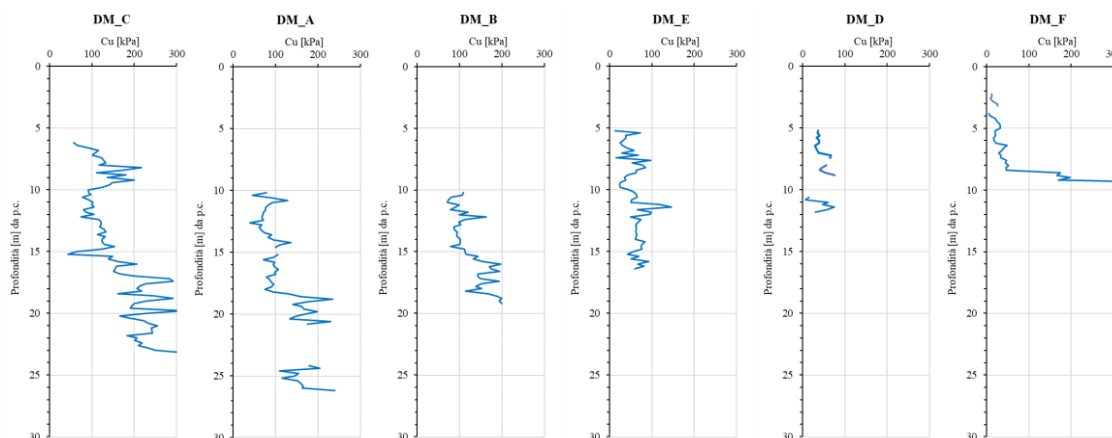


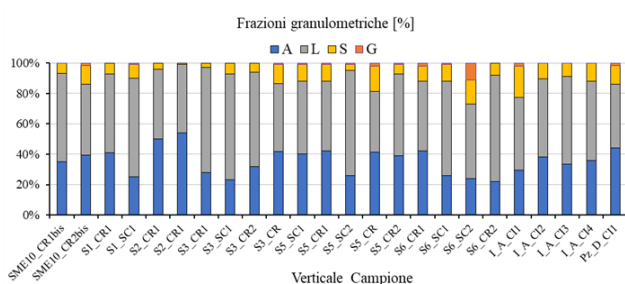
Figura 3-8 – Valori di c_u per le verticali indagate

Nella parte inferiore del versante (DM_A, DM_B, DM_C) la resistenza non drenata (c_u) risulta compresa fra 100 e 200 kPa mentre, nelle zone sommitali (DM_D e DM_F) e perimetrali (DM_E), i valori di c_u sono minori, attestandosi fra 20 e 60 kPa, e testimoniano uno stato di minore consistenza dei depositi dovuto all'attività dei fenomeni.

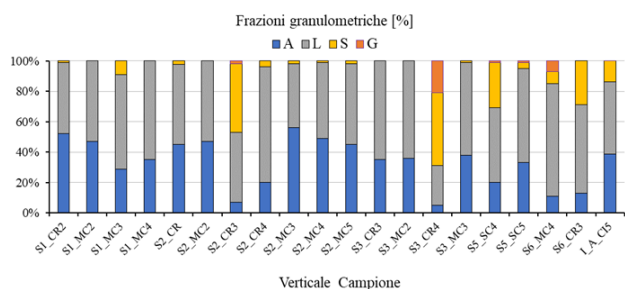
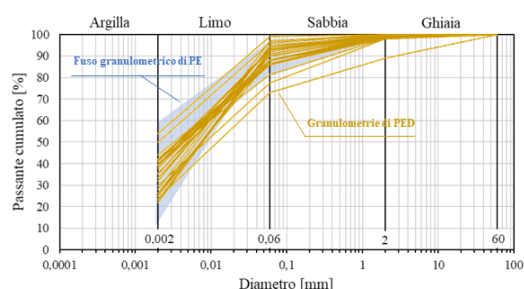
parametri di stato

- peso di volume naturale;
- contenuto d'acqua naturale;
- indice dei vuoti.

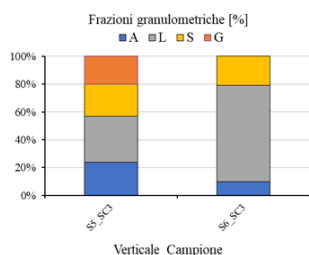
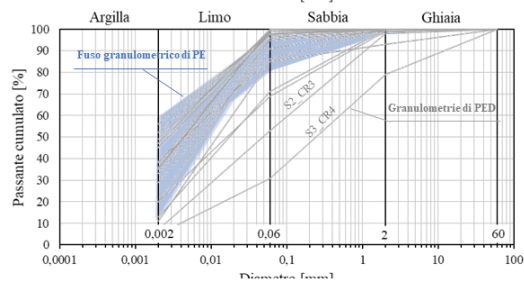
Curve granulometriche e distribuzioni delle frazioni (in accordo alle Raccomandazioni AGI,1977) sono rappresentate in Figura 3-9. Se si escludono i risultati riferibili ai campioni prelevati all'interno dei livelli più grossolani dell'unità 2 (S2_CR3 ed S3_CR4), le distribuzioni granulometriche per le due unità principali (UG1 ed UG2) risultano sovrapponibili, con la frazione fine (A+L) che risulta sempre superiore al 70%.



UG1



UG2



OD

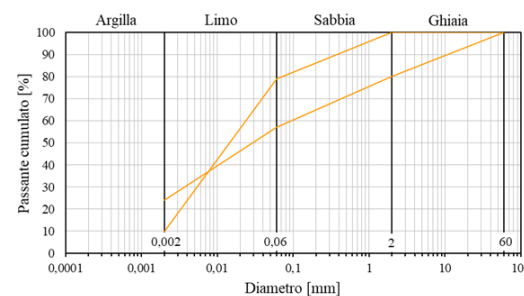


Figura 3-9 – curve granulometriche riferite alle unità geotecniche UG1 e UG2 e all'inclusione granulare OD

Anche il **peso specifico dei grani** risulta poco variabile, con valore medio γ_s di 26 kN/m³.

Sulla frazione fine dei diversi campioni sono stati determinati il limite di liquidità (LL) ed il limite di plasticità (LP). Sulla **Carta di plasticità** (Figura 3-10) i punti rappresentativi per UG1 e UG2 si collocano nel campo delle Argille inorganiche a media e alta plasticità. La frazione fine dell'unità granulare OD e dei due campioni più grossolani dell'unità 2 (S2_CR3 ed S3_CR4) è caratterizzata da bassa plasticità.

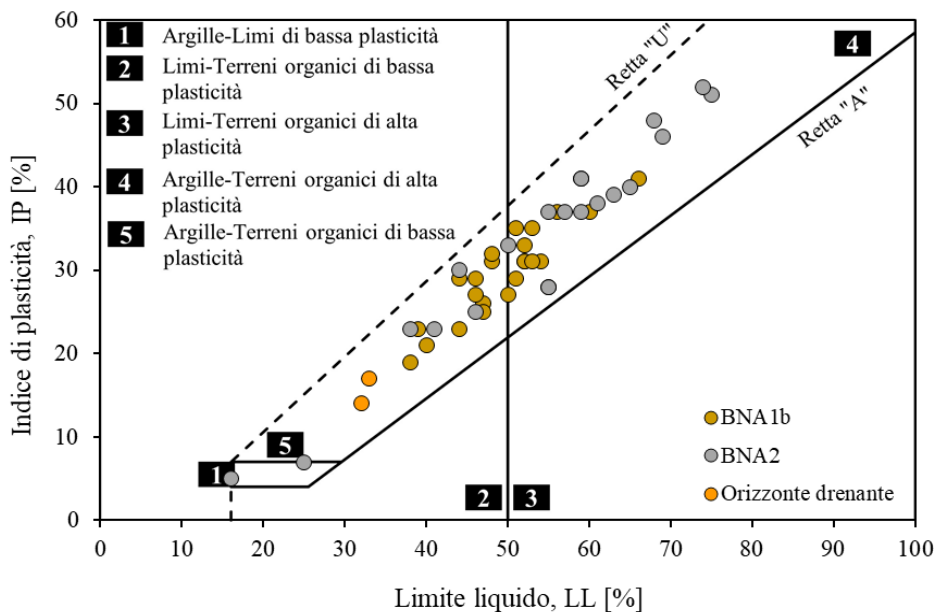


Figura 3-10 – Carta di plasticità di Casagrande

I valori del **peso dell'unità di volume** per i campioni indisturbati sono rappresentati in Figura 3-11. Per i campioni di UG1 è compreso tra 18,5 e 20,3 kN/m³ e per UG2 tra 19,5 e 21,5 kN/m³, coerentemente con l'aumento dello stato di addensamento con la profondità.

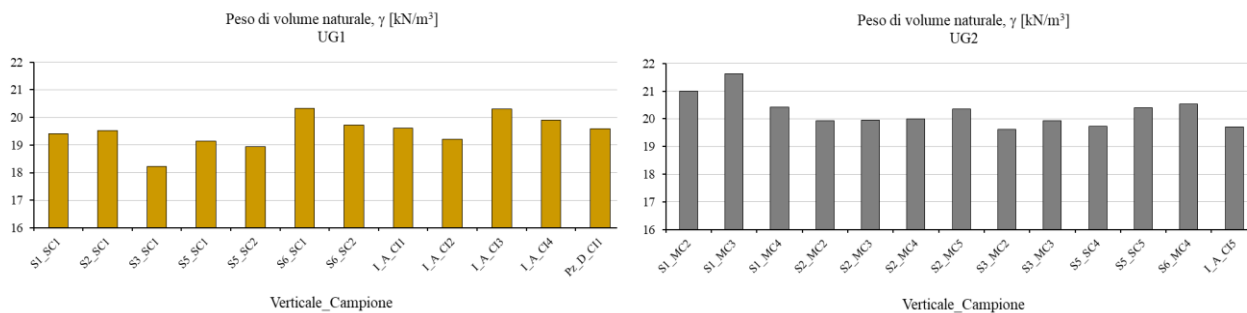


Figura 3-11 – Peso dell'unità di volume

Lo stato di addensamento maggiore per l'unità UG2 più profonda rispetto alla UG1 è testimoniato anche dai valori medi minori del contenuto d'acqua e, di conseguenza, dell'indice dei vuoti (Figura 3-12, Figura 3-13). L'indice dei vuoti (e) per l'UG1 è compreso tra 0,6 e 0,8 mentre per l'UG2 risulta compreso tra 0,4 e 0,58.

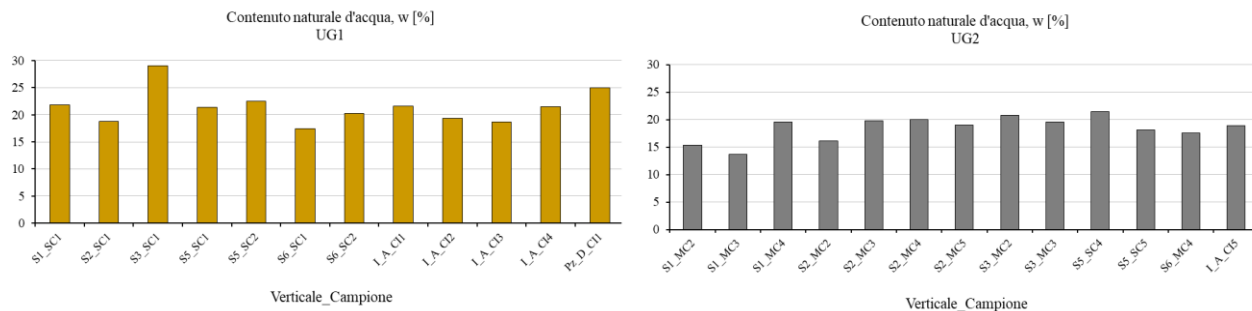


Figura 3-12 – Contenuto d'acqua naturale

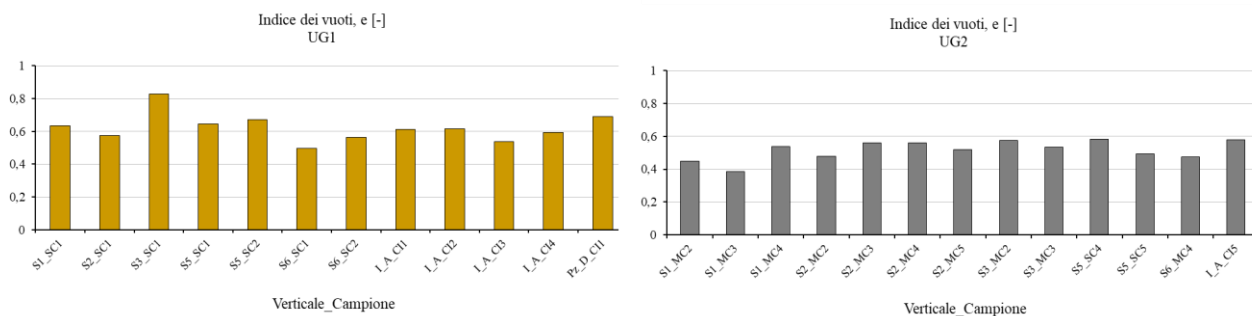


Figura 3-13 - Indice dei vuoti

3.3.2 Caratteristiche di resistenza in tensioni efficaci

UG1 - Resistenza al taglio di picco ed a volume costante

I risultati delle prove di resistenza di Taglio Diretto su campioni di terreno indisturbati dell'unità UG1 sono presentati, in Figura 3-14. I punti sperimentali si allineano su un involucro delle resistenze di picco con valori della coesione $c'_p = 14$ kPa e dell'angolo di attrito $\phi'_p = 26^\circ$.

Le prove sui campioni IA_CI2 ed IA_CI4, eseguite a tensioni maggiori, possono essere utili per determinare l'involuppo di resistenza in condizioni di volume costante, con valore $\phi'_{cv} \approx 27^\circ$.

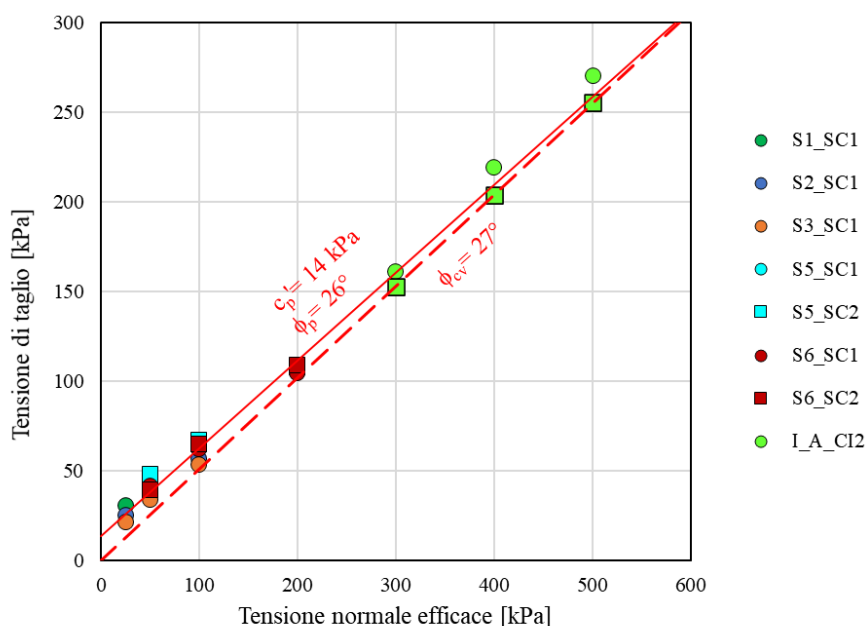


Figura 3-14 - UG1. Involuppo di rottura di picco da prove di taglio diretto

In Figura 3-15, i valori della resistenza di picco per le prove di P.E.D. (campione S6_C2 di fase I e i campioni IA_CI1 e IA_CI3 di fase 2) registrati nel corso delle prove in cella triassiale (CIU) sono messi a confronto con i valori ottenuti dalle prove realizzate per il P.E., sui campioni prelevati lungo la verticale VI03-1, nel piano degli invarianti $t-s'$.

Si nota come le resistenze ottenute dalle prove sui campioni IAC1 e IAC3 siano sempre inferiori a quelle dei campioni V103, probabilmente a causa del disturbo prodotto dal campionamento. Tenuto conto del comportamento fragile dei terreni indagati, le prove possono essere utili per un'indicazione approssimata dei valori di resistenza residua, piuttosto che di picco.

Le caratteristiche di resistenza del campione S5_C2, così come quelle dei campioni sottoposti a prova nel corso delle precedenti fasi progettuali nella medesima unità (VI03-1 e 2), risultano mediamente superiori a quelle ottenute dalle prove di taglio.

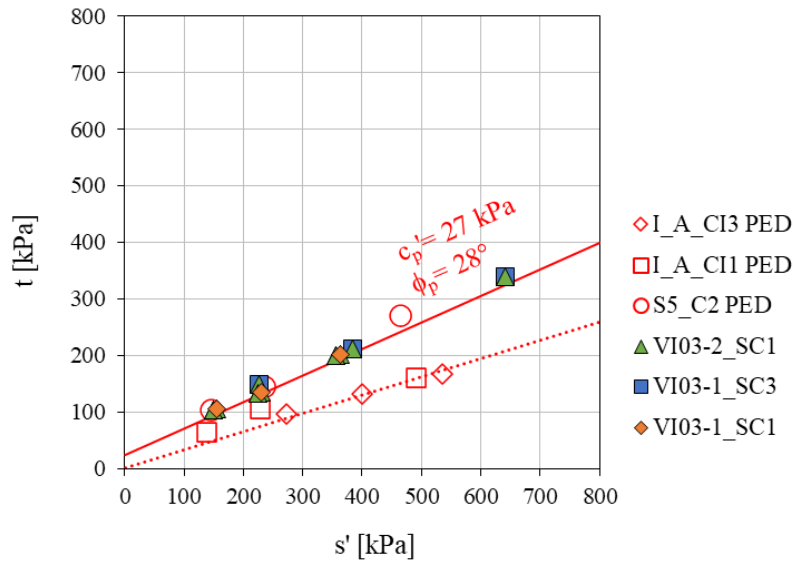


Figura 3-15 – UG1. Inviluppo di rottura di picco da in cella triassiale tipo CIU

In sintesi, le caratteristiche di resistenza al taglio di picco in tensioni efficaci della unità UG1 nell'intervallo tensionale considerato, possono essere cautelativamente descritte con un inviluppo caratterizzato dai seguenti parametri:

$$c'_p \cong 14 \div 27 \text{ kPa} \quad \phi'_p \cong 26^\circ$$

I valori derivati per i parametri di picco risultano in accordo con i corrispondenti valori della caratterizzazione meccanica del PE.

UG2 - Resistenza al taglio di picco

I risultati delle prove di resistenza in scatola di Taglio diretto condotte su campioni di terreno indisturbati appartenenti all'unità UG2 sono presentati, in Figura 3-16. I dati sperimentali sono tutti coerenti fra loro e si allineano su un inviluppo di picco caratterizzato da coesione $c'_p = 18 \text{ kPa}$ e dell'angolo di attrito $\phi'_p = 25^\circ$.

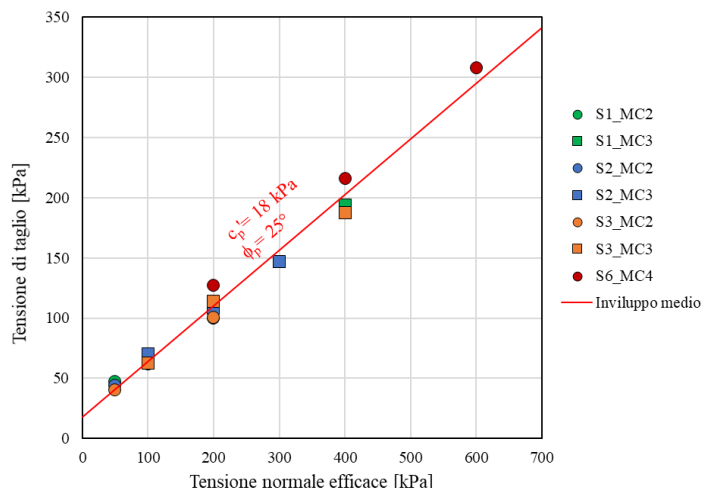


Figura 3-16 – UG2. Involuppo di rottura di picco da prove di taglio diretto

In figura si riportano gli involuppi di rottura di picco registrati nelle prove in cella triassiale (CIU) per i campioni S5_SC4 ed S2_MC4 prelevati alla profondità di circa 40m. I valori a rottura riferiti al campione IA_CI5, non sono rappresentati in quanto la prova (P.E.D. fase 2) risulta affetta dalle medesime incertezze sperimentali illustrate in precedenza. Di nuovo i dati sperimentali sono coerenti fra loro ed individuano un involucro di resistenza rettilineo con coesione $c'_p = 35$ kPa e dell'angolo di attrito $\phi'_p = 28^\circ$.

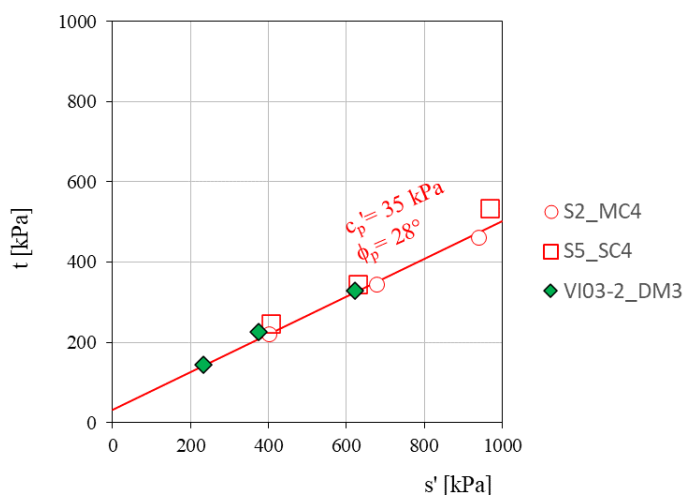


Figura 3-17 – UG2. Involuppo di rottura di picco da in cella triassiale tipo CIU

La maggiore resistenza risultante dalle prove triassiali rispetto a quelle delle prove di taglio diretto si può interpretare come l'effetto della stratificazione che caratterizza la formazione e che favorisce la rottura nelle prove di taglio diretto (Castellanos B.A., Brandon T.L., 2013).

Le caratteristiche di resistenza al taglio di picco in tensioni efficaci della unità UG2 nell'intervallo tensionale considerato possono essere quindi cautelativamente descritte dai seguenti inviluppi:

minimo	$c'_p \cong 18\text{kPa}$	$\phi'_p \cong 25^\circ$
massimo	$c'_p \cong 35\text{kPa}$	$\phi'_p \cong 28^\circ$

con l'inviluppo minimo suggerito per i terreni dei depositi superficiali e l'inviluppo massimo per quelli appartenenti ai depositi marnosi profondi ($z > 25\text{m}$).

Resistenza al taglio residua

In virtù della omogeneità di composizione dei materiali appartenenti alle unità UG1 e UG2, la resistenza al taglio residua è risultata poco variabile.

La resistenza in condizioni residue è stata valutata sulla base delle specifiche prove eseguite dopo vari cicli di taglio diretto (TD) (sia su campioni indisturbati che rimaneggiati) o in scatola di taglio anulare (TA). Le caratteristiche dei campioni e delle modalità di prova sono riportate in Tabella 4.

Tabella 4 – caratteristiche dei campioni sottoposte alle prove per la determinazione della resistenza residua

Sondaggio_Campione	Tipologia prova	Profondità [m] da p.c.		Velocità di taglio [mm/min]	Scorrimento cum. [mm]	Frazioni granulometriche [%] secondo A.G.I.				LL [%]	LP [%]	IP [%]	ϕ_r [°]
		da	a			G	S	L	A				
SME10_CR1bis	TD	11,7	11,9	0,003	35,7	0,2	6,7	58,0	35,1	51	22	29	14,0
SME10_CR2bis	TA	13,6	13,9	0,03	27,0	1,58	12,4	46,8	39,3	40	19	21	16,2
S3_SC1	TD	4,5	5	0,006	34,2	0,0	7,0	70,0	23,0	39	16	23	16,7
S3_CR	TA	8	8,5	0,09	27,7	1,01	12,5	44,6	41,9	47	21	26	20,3
I_A_CI2	TD	15	15,5	0,002	36,4	0,2	10,0	51,8	38,0	52	21	31	21,8
I_A_CI4	TD	25,3	25,8	0,002	37,2	0,2	11,7	52,3	35,8	53	22	31	22,3
S5_CR	TA	13	13,4	0,03	24,0	1,9	16,7	40,0	41,5	44	21	23	24,2

I valori di angolo di attrito ottenuti ricadono all'interno del range atteso in base alle caratteristiche di plasticità (Figura 3-18).

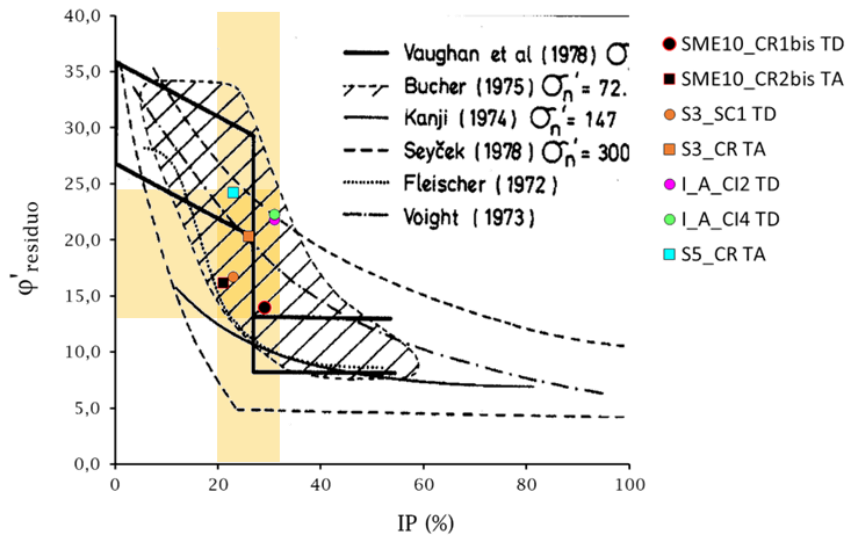


Figura 3-18 – relazione tra l'angolo d'attrito residuo e l'indice di plasticità (Lupini et al., 1981)

Si sottolinea in particolare come i campioni della verticale SME10, prelevati dalla cassetta proprio alla profondità dove si localizzano gli spostamenti in base agli inclinometri, danno valori di resistenza residua ϕ'_r pari a 14° come già osservato per i campioni VI03-1 alle profondità di -11 m e -24m da p.c..

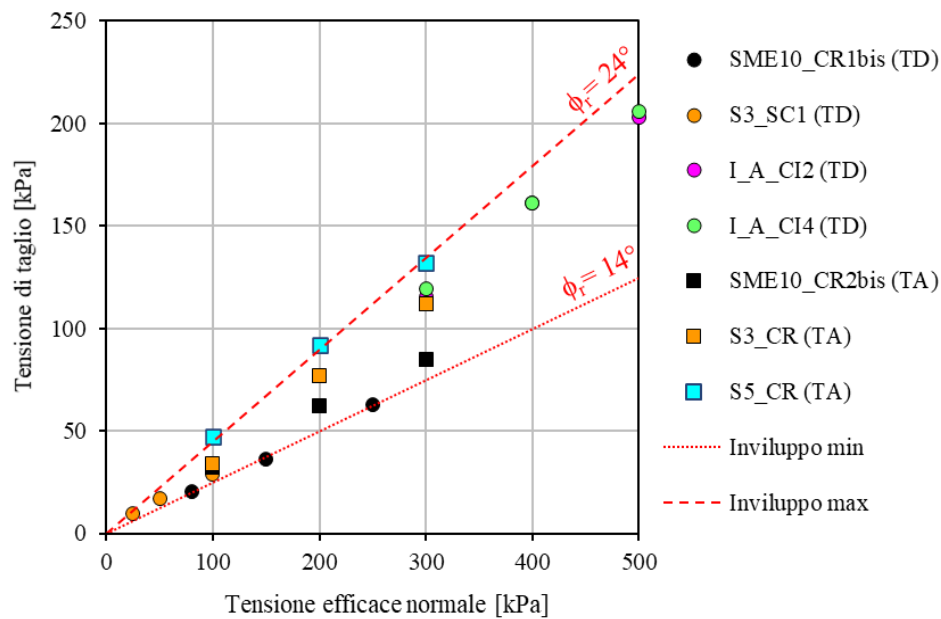


Figura 3-19 – Range degli involucri di rottura in condizioni residue

3.3.3 Permeabilità

Nel corso delle indagini integrative di P.E.D. (II fase), la permeabilità è stata misurata in laboratorio su un campione indisturbato della verticale Pz_D alla quota di 10-10,5 m da p.c. all'interno della formazione UG1.



In particolare si è utilizzata una prova a carico idraulico variabile. Prendendo a riferimento uno sforzo efficace di 200 kPa, indice dei vuoti di 0,64, è risultato un coefficiente di permeabilità $k = 10^{-11}$ m/s.

Il valore misurato in laboratorio risulta decisamente inferiore ai valori ottenuti dalle prove in situ (cfr. §2.2.1), a conferma della influenza dei livelli sabbiosi sul comportamento idraulico del deposito indagato.

4 PIOGGE E MOVIMENTI DI VERSANTE

4.1 PLUVIOMETRIA E CONFRONTO CON GLI SPOSTAMENTI OSSERVATI

In Figura 4-1 si riporta la sovrapposizione fra l'istogramma delle precipitazioni medie mensili (valutate nel periodo che va dal 2009 al 2020) e quelle misurate dalla stazione di Melito Irpino per gli anni 2019-2022.

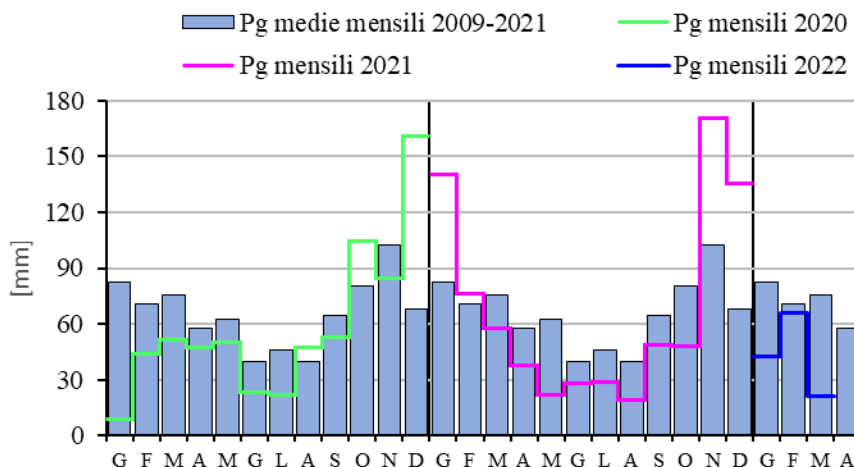


Figura 4-1 – Stazione pluviometrica di Melito Irpino. Confronto fra precipitazioni medie mensili dal 2009 al 2019 vs precipitazioni mensili del periodo 2020-2022.

Si osserva come i recenti periodi di eccedenza pluviometrica rispetto alle medie mensili si verificano nei mesi di dicembre e gennaio. Negli stessi mesi si assiste ad un aumento dell'andamento della precipitazione che determina una generale accelerazione del fenomeno (Figura 4-2). In particolare gli spostamenti risultano ben correlabili alla piovosità, considerando una precipitazione cumulata su un periodo di circa 60 giorni. D'altra parte risulta un certo sfasamento fra gli spostamenti della porzione inferiore del versante (S5, S6 ed IA) rispetto a quelli del tratto a monte, con questi ultimi che anticipano quelli precedenti.

Il controllo dell'idraulica del versante appare dunque un fattore chiave per conseguire adeguati margini di stabilità.

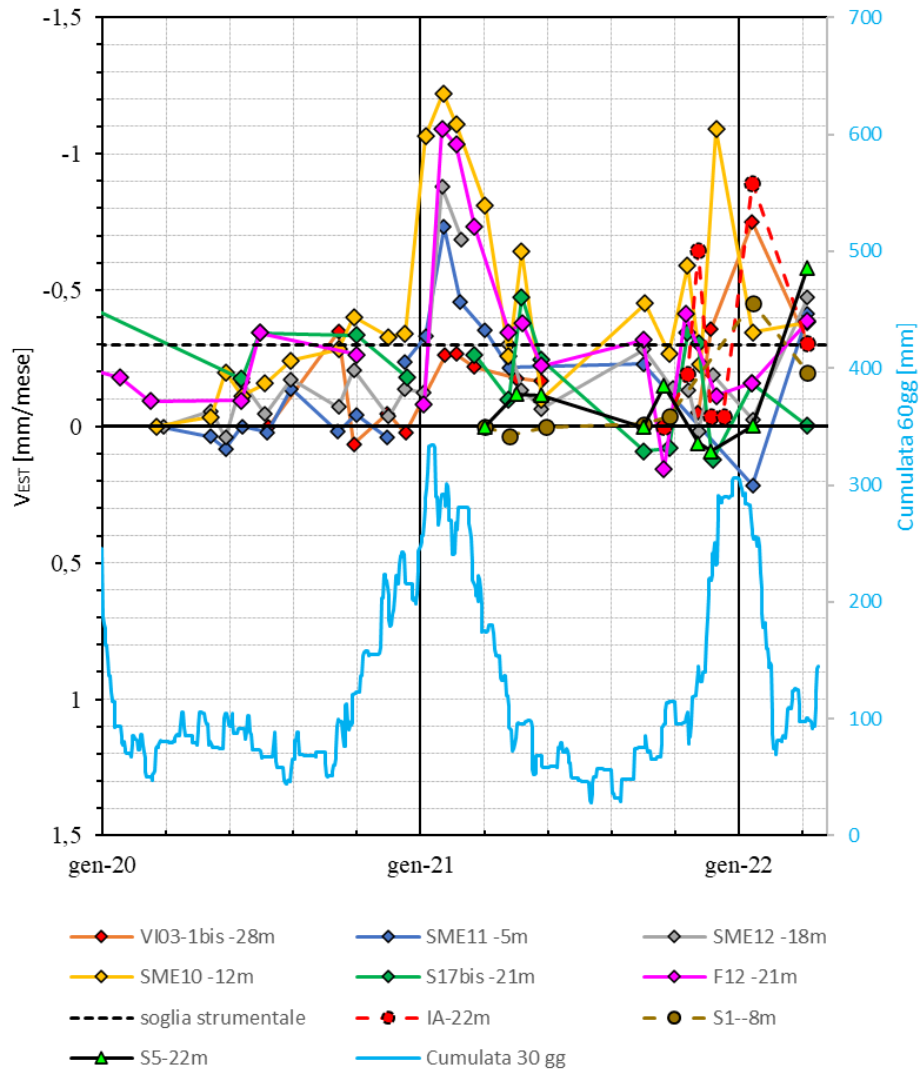


Figura 4-2 – Andamento nel tempo delle velocità di spostamento inclinometrici alle profondità di scorrimento.

4.2 MODELLO GEOMETRICO ED IDRAULICO DEL CORPO DI FRANA

La posizione delle quote di scorrimento indicate dagli inclinometri (Figura 4-3) può essere messa in relazione con alcune delle zone di debolezza individuate mediante le prove dilatometriche e soprattutto che risultano dalle misure inclinometriche eseguite dopo dicembre 2022 (Figura 2-9).

Alla luce di tali evidenze cinematiche e dal quadro stratigrafico emerso a seguito delle indagini è possibile ricostruire un modello geometrico ed idraulico affidabile del fenomeno di dissesto.

Lo scorrimento si verifica in prossimità del contatto fra i due complessi denominati UG1 e UG2.

È possibile distinguere due corpi in movimento all'interno del cinematismo rilevato:

Il primo corpo è quello principale che raggiunge la profondità di 20÷24m ed interessa la parte inferiore del versante; questo corpo in movimento coinvolge per intero l'imbocco della GN04 e si chiude al piede del pendio, a quota 200m su l.m.m., circa a 22÷24m da p.c.. La superficie di rottura passa al di sopra dell'orizzonte drenante, probabile "motore" del movimento in quanto causa di repentini incrementi del livello freatico nei periodi con precipitazioni più intense.

La complessità della risposta meccanica e idraulica che si riscontra in questo settore del movimento risulta dalla presenza di fasce di spessore anche modesto capaci di generare delle sovrappressioni idrauliche su orizzonti concentrati (probabilmente coincidenti con le superfici di scorrimento), e dal ritardo esibito da alcuni inclinometri (S5 ed S6) posti nella porzione inferiore rispetto al picco del periodo di precipitazione.

La parte di versante a monte dell'imbocco (monitorato dagli inclinometri SME 11 ed S1), è probabilmente sede di un fenomeno "secondario", ovvero sia conseguente al richiamo determinato dal movimento principale. Questa parte di cinematismo coinvolge uno spessore di terreno fra 5 e 10m e si estende fino quasi alla cresta del versante, dove sono state osservate fessure di trazione.

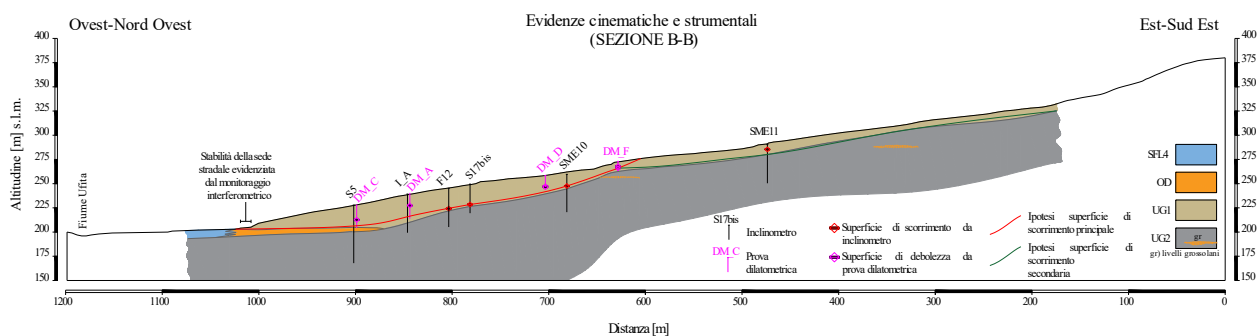


Figura 4-3 – Geometria del corpo di frana. Sezione di riferimento B-B'

Dal punto di vista dell'idraulica di versante, il livello idraulico all'interno del corpo principale varia fra -5m da p.c. e quota p.c., in ragione dell'andamento delle precipitazioni mentre, nella zona secondaria a monte, l'oscillazione della falda è modesta, intorno ad una quota media di pochi metri al disotto del p. c.

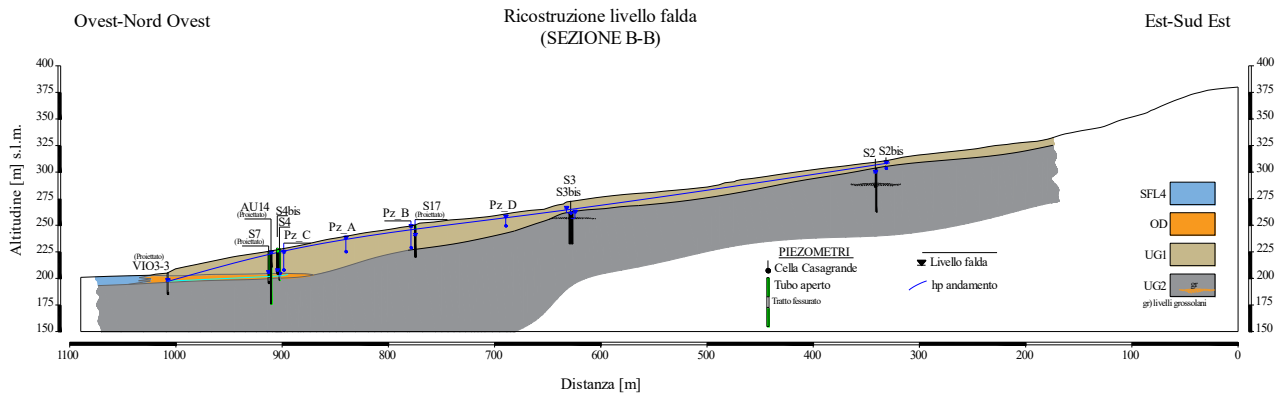


Figura 4-4 – Livelli piezometrici all'interno del corpo di frana. Sezione di riferimento B-B'

4.3 ANALISI A RITROSO DEL MECCANISMO DI FRANA E PARAMETRI GEOTECNICI

Definito il modello geotecnico di riferimento del pendio in termini di geometria del fenomeno e condizioni al contorno di tipo idraulico, si procede con analisi a ritroso per verificare l'attendibilità del modello cinematico attraverso il confronto fra i parametri geotecnici che assicurano il movimento e quelli ottenuti dalle prove di laboratorio.

Per il caso specifico sono state condotte analisi all'equilibrio limite secondo lo schema di Morgenstern e Price in riferimento ai cinematismi indicati in Figura 4-5: il cinematismo principale (in rosso) si sviluppa nel settore inferiore del versante ed il cinematismo secondario (in verde) si estende a monte della verticale S3bis. Nelle analisi è stata fatta variare la condizione idraulica al contorno del versante fra i due livelli limite registrati dal monitoraggio recente (cfr Figura 4-4): novembre (min) e dicembre (max) 2021.

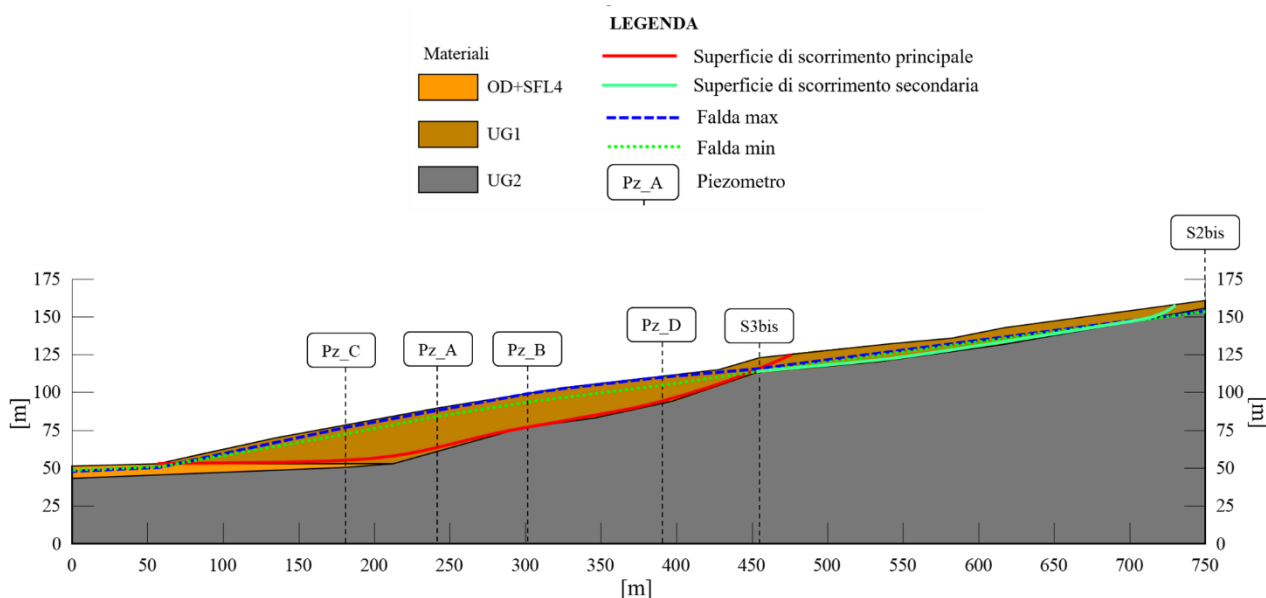


Figura 4-5 – ipotesi geometriche e piezometriche di partenza adottate per le analisi

Adottando l'ipotesi di falda minima (posta a -5m da p.c. nei piezometri Pz_C, Pz_A, Pz_B e Pz_D), il cinematismo principale (superficie in rosso) raggiunge la condizione di instabilità incipiente ($FS \approx 1$) con valori dell'angolo di attrito (ϕ') pari a 14° .

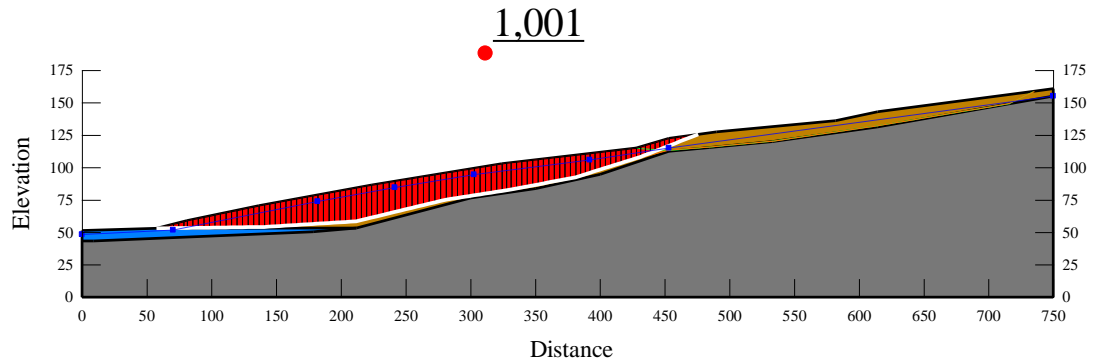


Figura 4-6 – Falda minima + $\phi' = 14^\circ$. Cinematismo principale

Adottando l'ipotesi di falda massima (falda a p.c.) si verificano i seguenti scenari:

- a) il cinematismo principale (superficie in rosso) raggiunge la condizione di instabilità incipiente ($FS \approx 1$) per valori di attrito (ϕ') pari a 17° ;

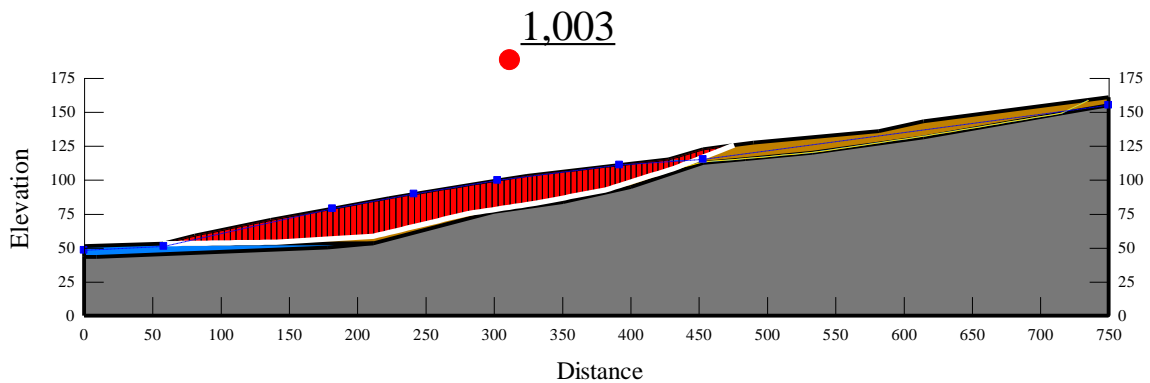


Figura 4-7 – Falda massima + $\phi' = 17^\circ$. Cinematismo principale

- b) un cinematismo che coinvolge sia il cinematismo principale che il secondario (nel modello esteso verso monte fino alla verticale S2) raggiunge la condizione di instabilità incipiente ($FS \approx 1$) per valori di attrito (ϕ') di poco superiori a 14° .

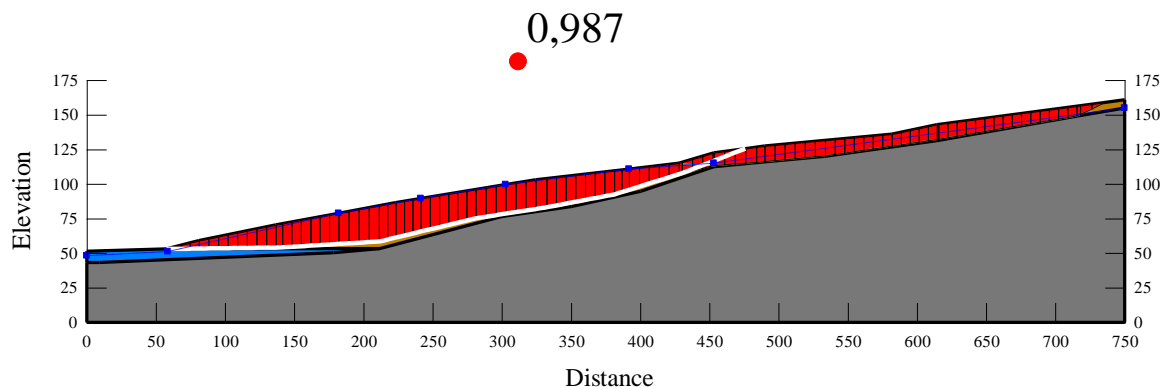


Figura 4-8 – Falda massima + $\phi' = 14^\circ$. Cinematismo principale+secondario

Le analisi permettono dunque di individuare un campo di variabilità dell'angolo di attrito che è pienamente congruente con i valori dell'angolo di attrito residuo determinati sperimentalmente e con ciò giustificano, indirettamente, la cinematica del fenomeno ipotizzata negli schemi.

In particolare, l'adozione dell'angolo di attrito residuo minimo (ϕ'_r) di 14° consente di giustificare la progressione del fenomeno registrata da alcuni strumenti

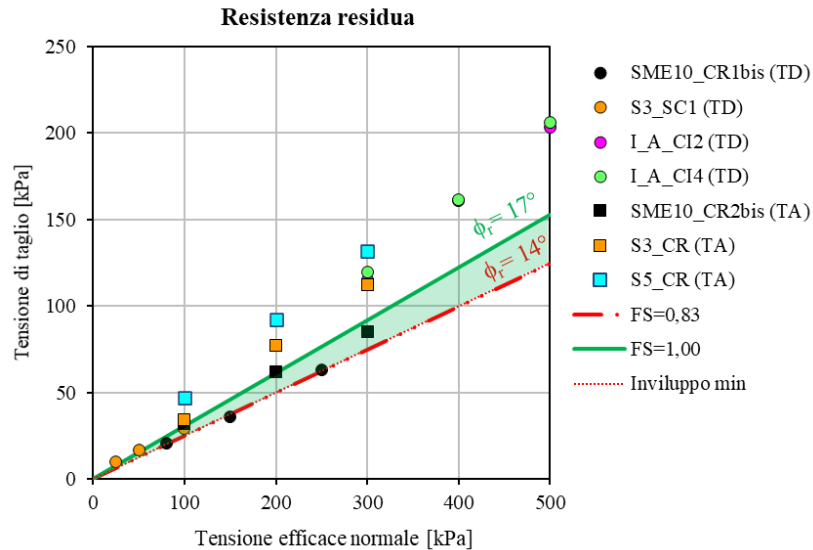


Figura 4-9 – risultati delle analisi di sensibilità per la superficie di ipotesi 2



5 CONCLUSIONI

Nel presente documento, dopo la presentazione dei risultati di indagini integrative eseguite sul versante Melito NA durante lo sviluppo del P.E.D. comprendenti nuovi sondaggi, prove in sito e di laboratorio, prospezioni geofisiche, e la loro integrazione nel quadro sperimentale stabilito nel corso della progettazione definitiva ed esecutiva, si è sviluppato l'aggiornamento del modello geotecnico per una valutazione dello stato di progetto delle opere.

Le integrazioni di indagine si sono rese necessarie allorquando tra l'autunno del 2021 e il primo semestre del 2021, il monitoraggio del versante evidenziava segnali di movimenti profondi, in particolare nella zona del piazzale di imbocco dove si riscontra il passaggio della superficie di scorrimento a circa 20 metri di profondità dall'attuale piano campagna.

L'insieme dei dati disponibili ha permesso di stabilire uno schema del cinematiso di versante che è risultato congruente con le osservazioni sperimentali, in particolare con tale schema è possibile giustificare i movimenti osservati in occasione dei periodi di elevata piovosità