

S.S. 67 "Tosco Romagnola"  
Lavori di adeguamento della S.S. 67 nel tratto tra la località S.Francesco in Comune di Pelago e l'abitato di Dicomano.  
Variante di Rufina (FI) – LOTTI 2A e 2B

**PROGETTO DEFINITIVO**

COD. FI462

PROGETTAZIONE:  
RAGGRUPPAMENTO  
TEMPORANEO PROGETTISTI

MANDATARIA:



MANDANTI:



**sinergo**



IL RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

*Ing. Riccardo Formichi – Società Pro Iter Srl  
Ordine Ingegneri Provincia di Milano n. 18045*

IL GEOLOGO:

*Geol. Massimo Mezzanatica – Società Pro Iter Srl  
Ordine Geologi della Lombardia n. 762*

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

*Ing. Massimo Mangini – Società Erre.Vi.A Srl  
Ordine Ingegneri Provincia di Varese n. 1502*

VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO:

*Ing. Francesco Pisani*

PROTOCOLLO:

DATA:



**03 - GEOLOGIA GEOTECNICA E SISMICA**

**03.01 - Geologia**

**Relazione di compatibilità geomorfologica**

| CODICE PROGETTO |             | NOME FILE               |                |           | REVISIONE   | SCALA     |
|-----------------|-------------|-------------------------|----------------|-----------|-------------|-----------|
| PROGETTO        | LIV. PROG.  | T00-GE01-GEO-RE10-A.pdf |                |           |             |           |
| ACNO0113        | D 20        | CODICE ELAB.            | T00GE01GEORE10 |           | A           |           |
| D               |             |                         |                |           |             |           |
| C               |             |                         |                |           |             |           |
| B               |             |                         |                |           |             |           |
| A               | EMISSIONE   |                         | 02/2024        | SILVESTRI | MEZZANATICA | FORMICHI  |
| REV.            | DESCRIZIONE |                         | DATA           | REDATTO   | VERIFICATO  | APPROVATO |

|  |  |  |                 |         |
|--|--|--|-----------------|---------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  | REV.            | FOGLIO  |
|  | MANDATARIA<br><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br>  <br>D_VisionArchitecture | A               | 1 di 72 |
|  |  |  | Data<br>02/2024 |         |

## INDICE

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Premessa.....  | 3  |
| 2     | Normativa e documenti di riferimento .....   | 9  |
| 2.1   | Normativa di riferimento.....  | 9  |
| 2.2   | Documenti di Base.....   | 9  |
| 2.3   | Elaborati di Progetto Definitivo.....  | 9  |
| 3     | Inquadramento geologico-strutturale dell'area.....                                       | 12 |
| 4     | Unità stratigrafiche presenti nell'area di frana.....                                    | 16 |
| 5     | Indagini geognostiche.....   | 18 |
| 5.1   | Campagna di indagine geognostica 2021-2022 .....   | 18 |
| 5.1.1 | Piezometri - Geoconsol Srl.....  | 18 |
| 5.1.2 | Indagini geognostiche in sito - Eurogeo Srl .....  | 18 |
| 5.2   | Campagna di indagine geognostica integrativa 2023.....                                   | 22 |
| 5.2.1 | Sismica a rifrazione in onde P e SH .....  | 22 |
| 5.2.2 | Geoelettrica.....  | 23 |
| 5.2.3 | Prove dilatometriche Marchetti.....  | 24 |
| 5.2.4 | Monitoraggio inclinometrico e piezometrico.....  | 24 |
| 6     | Analisi interferometrica di immagini radar satellitari .....                             | 34 |
| 6.1   | Generalità.....  | 34 |
| 6.2   | Analisi dei valori di velocità dei PS nell'area di frana tra le p.k. 0+925 e 1+300 ..... | 38 |
| 6.3   | Analisi fotointerpretativa stereoscopica e rilievo geomorfologico.....                   | 40 |
| 7     | Caratterizzazione sismica.....   | 41 |
| 7.1   | Stati limite nei confronti delle azioni sismiche .....                                   | 41 |
| 7.2   | Periodo di riferimento per l'azione sismica.....   | 42 |
| 7.3   | Parametri sismici .....  | 42 |
| 7.4   | Categoria sismica dei suoli di fondazione .....  | 43 |
| 7.4.1 | Definizione delle categorie di sottosuolo per la progettazione .....                     | 44 |
| 7.4.2 | Coefficiente di amplificazione topografica.....  | 45 |
| 7.4.3 | Caratterizzazione sismica dell'area di frana .....                                       | 45 |
| 7.4.4 | Analisi pseudostatiche.....  | 45 |
| 7.4.5 | Stabilità di fronti di scavo e rilevati.....   | 46 |
| 7.4.6 | Opere di sostegno.....   | 46 |
| 7.4.7 | Manufatti scatolari.....   | 46 |
| 7.4.8 | Paratie .....  | 46 |
| 8     | Studio geotecnico dell'area di frana tra le p.k. 0+925 e 1+300.....                      | 48 |
| 8.1   | Classificazione geomorfologica della frana .....   | 48 |
| 8.2   | Analisi interferometrica di immagini radar satellitari .....                             | 48 |
| 8.3   | Indagini geognostiche eseguite nell'area di frana.....                                   | 48 |

|  |  |  |  |   |                   |
|--|--|--|--|---|-------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  |  | REV.<br>A   | FOGLIO<br>2 di 72 |
|  | MANDATARIA<br> <b>PRO ITER</b><br>Progetto<br>Infrastrutture<br>Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> <b>EITVIA</b><br>ENERGIA VALLE D'AOSTA<br>s.r.l. |  <b>sinèrgo</b><br>s.p.a. |  <b>D_VA</b><br>DVisionArchitecture | Data<br>02/2024   |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 8.3.1 | Sondaggi geognostici a carotaggio continuo ..... | 49 |
| 8.3.2 | Prove geotecniche di laboratorio .....           | 49 |
| 8.3.3 | Sismica a rifrazione in onde P e SH .....        | 50 |
| 8.3.4 | Goelettrica.....                                 | 57 |
| 8.3.5 | Prove con dilatometro piatto Marchetti .....     | 62 |
| 8.3.6 | Monitoraggio inclinometrico.....                 | 64 |
| 8.3.7 | Monitoraggio piezometrico .....                  | 65 |
| 8.4   | Back-analysis del fenomeno franoso .....         | 65 |
| 8.5   | Sintesi conclusiva .....                         | 69 |

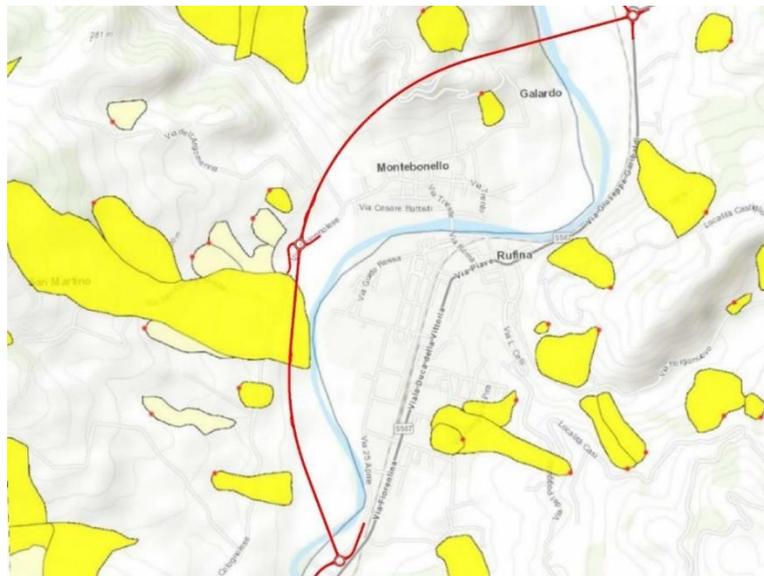
|  |  |  |                 |                   |
|--|--|--|-----------------|-------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  | REV.<br>A       | FOGLIO<br>3 di 72 |
|  | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETIWA</b><br>ENERGIA VALLETTA AMBIENTE<br><b>sinèrgo</b><br>DVISIONArchitecture | Data<br>02/2024 |                   |

## 1 PREMESSA

La presente relazione ha per oggetto la compatibilità geomorfologica del tracciato stradale di circa 3.5 km noto come “Variante di Rufina (Lotti 2A e 2B)”, facente parte dei *Lavori di adeguamento della S.S. 67 “Tosco-Romagnola” nel tratto tra la località S. Francesco in Comune di Pelago e l’abitato di Dicomano*, che coinvolge i territori comunali Pontassieve (fraz. Montebonello) e Rufina, in provincia di Firenze.

In questa zona è segnalata dal PAI una *frana di scivolamento e colata lenta attiva (S3) e pericolosità geomorfologica molto elevata (P4)*, interferente direttamente con il tracciato tra le p.k. 0+925 e 1+300 circa, dove non sono previste opere d’arte particolari ma solo una sezione di rilevato/trincea. Nell’area il substrato della frana è riferibile alle *Argille e Calcari di Canétolo (ACC)*.

Nell’area di progetto il catalogo IFFI (cfr. *piattaforma IdroGEO*, <https://idrogeo.isprambiente.it/app/>, cfr. **Figura 1-1**), classifica tale frana come *scivolamento rotazionale/traslativo, con stato di attività n.d. (non determinato)*.

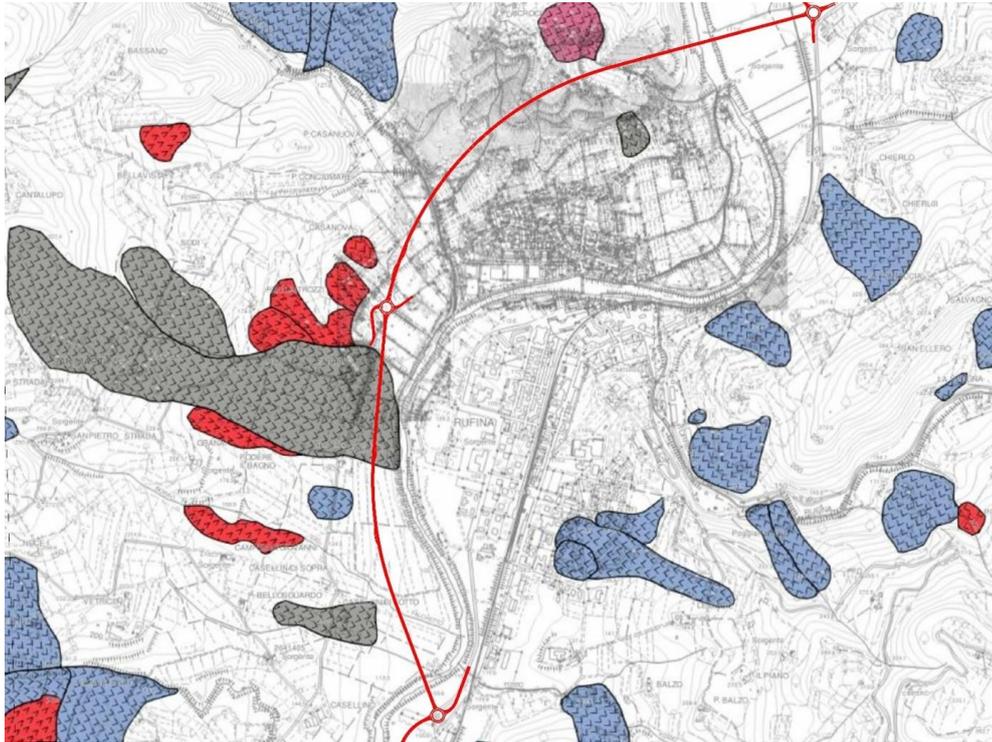


**Figura 1-1** - Rappresentazione cartografica dei fenomeni franosi nell’area di progetto nel catalogo IFFI (da sito web ISPRA piattaforma IdroGEO)

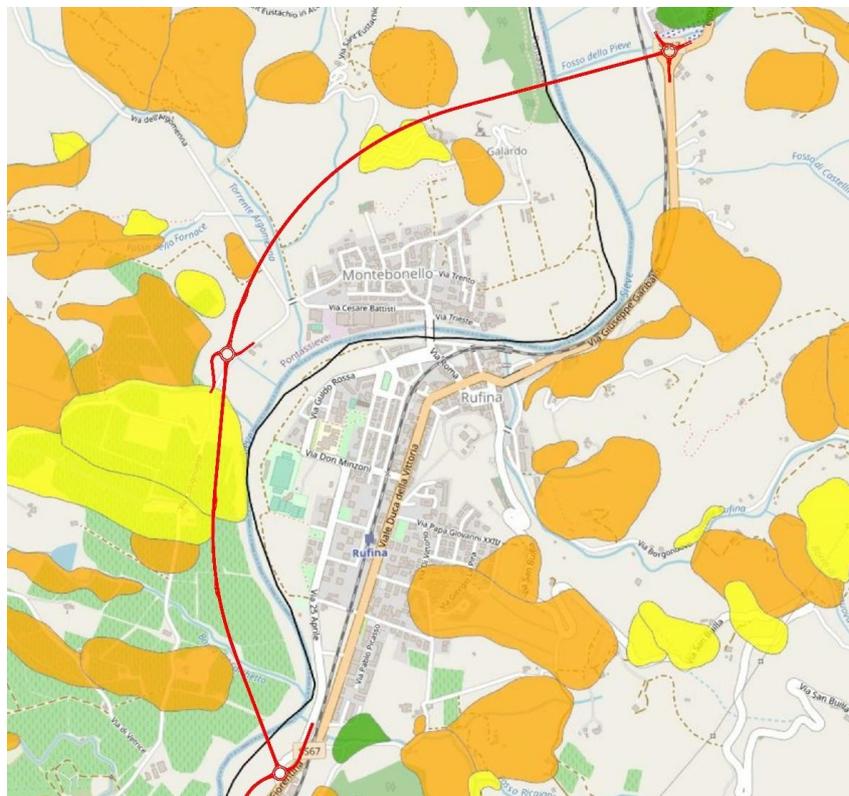
Dalla consultazione della Banca Dati geomorfologica della Regione Toscana nell’area di interesse (cfr. geoportale “GEOscopio”, pagina <http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/geomorfologia.html>, cfr. **Figura 1-2**) è possibile osservare che la perimetrazione risulta identica a quella riportata nel catalogo IFFI e che tale frana viene classificata sempre come *frana di scorrimento (velocità indeterminata)*, con *stato di attività indeterminata*.

L’Autorità di Bacino di riferimento per l’area in esame è l’*Autorità di Bacino Distrettuale dell’ Appennino Settentrionale*. Il bacino di riferimento per l’area è il *Bacino del Fiume Arno*, il cui PAI vigente è consultabile alla pagina [https://www.appenninosettentrionale.it/itc/?page\\_id=3487](https://www.appenninosettentrionale.it/itc/?page_id=3487). Tale PAI è entrato in vigore con la pubblicazione del D.P.C.M. 6 maggio 2005 “Approvazione del Piano di Bacino del fiume Arno, stralcio assetto idrogeologico” (GU n. 230 del 3/10/2005), mentre le norme di attuazione e gli allegati sono stati pubblicati sulla G.U. n. 248 del 24.10.2005. Alla pagina <https://geodataserver.appenninosettentrionale.it/portal/apps/webappviewer/index.html?id=72f02517284e4c5ba2f8a5310eff44e1>, è disponibile la cartografia della *pericolosità da processi geomorfologici di versante e da frana* (cfr. **Figura 1-3**).

|  |  |  |                 |         |
|--|--|--|-----------------|---------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  | REV.            | FOGLIO  |
|  | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETA</b> <b>VA</b><br>ENERGIA VALLE D'ARNO s.r.l. <b>sinèrgo</b> <b>VA</b><br>D'VisionArchitecture | A               | 4 di 72 |
|  |  |  | Data<br>02/2024 |         |

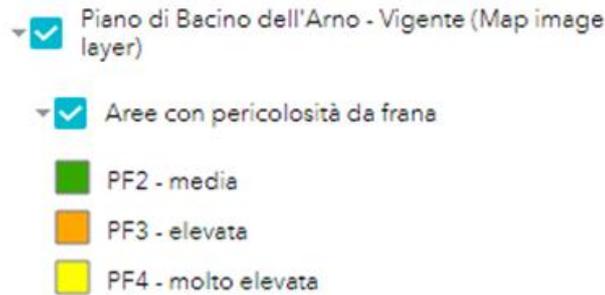


**Figura 1-2** - Rappresentazione cartografica dei fenomeni franosi nella Banca Dati geomorfologica della Regione Toscana (da sito web GEOscopio della Regione Toscana)



**Figura 1-3** - Rappresentazione cartografica della “pericolosità da processi geomorfologici di versante a da frana” presenti nell’area di progetto (da sito web dell’Autorità di Bacino Distrettuale Appennino Settentrionale – PAI Bacino del Fiume Arno).

|  |   |  |                 |         |
|--|---|--|-----------------|---------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |  | REV.            | FOGLIO  |
|  | MANDATARIA<br> | MANDANTI<br>   | A               | 5 di 72 |
|  |   |  | Data<br>02/2024 |         |



**Figura 1-4** – *Legenda della “pericolosità da processi geomorfologici di versante a da frana” (PAI Bacino del F. Arno).*

Dall'esame della cartografia è stato possibile verificare con il tracciato interferisce una frana a *pericolosità molto elevata PF4* tra le p.k. 0+925 e 1+300, in corrispondenza di un tratto in rilevato/trincea.

Inoltre, sono presenti una frana a *pericolosità elevata PF3* alla p.k. 1+770 in prossimità della Spalla 1 del Viadotto Argomena in progetto, che tuttavia risulta ubicata già sui depositi alluvionali, e una frana a *pericolosità molto elevata PF4*, tra le p.k. 2+342 e 2+560, dove tuttavia il tracciato è già in galleria naturale con una copertura di circa 85 m.

Recentemente è stato pubblicato il “*Progetto di Piano di bacino del distretto idrografico dell'Appennino Settentrionale, stralcio Assetto Idrogeologico per la gestione del rischio da dissesti di natura geomorfologica*” relativo al territorio dei bacini del fiume Arno, del fiume Serchio e degli ex bacini regionali della Toscana, altrimenti detto *Progetto di Piano - PAI “dissesti geomorfologici”*, adottato con delibera della Conferenza Istituzionale Permanente n.20 del 20 dicembre 2019 (G.U. n. 9 del 13.01.2020), consultabile alla pagina [https://www.appenninosettentrionale.it/itc/?page\\_id=5734](https://www.appenninosettentrionale.it/itc/?page_id=5734), mentre è possibile consultare la cartografia della *pericolosità da dissesti di natura geomorfologica* alla pagina: <https://geodataserver.appenninosettentrionale.it/portal/apps/webappviewer/index.html?id=14ca15f41e8e4396a1b27d788db98f60> (cfr. **Figura 1-5**).

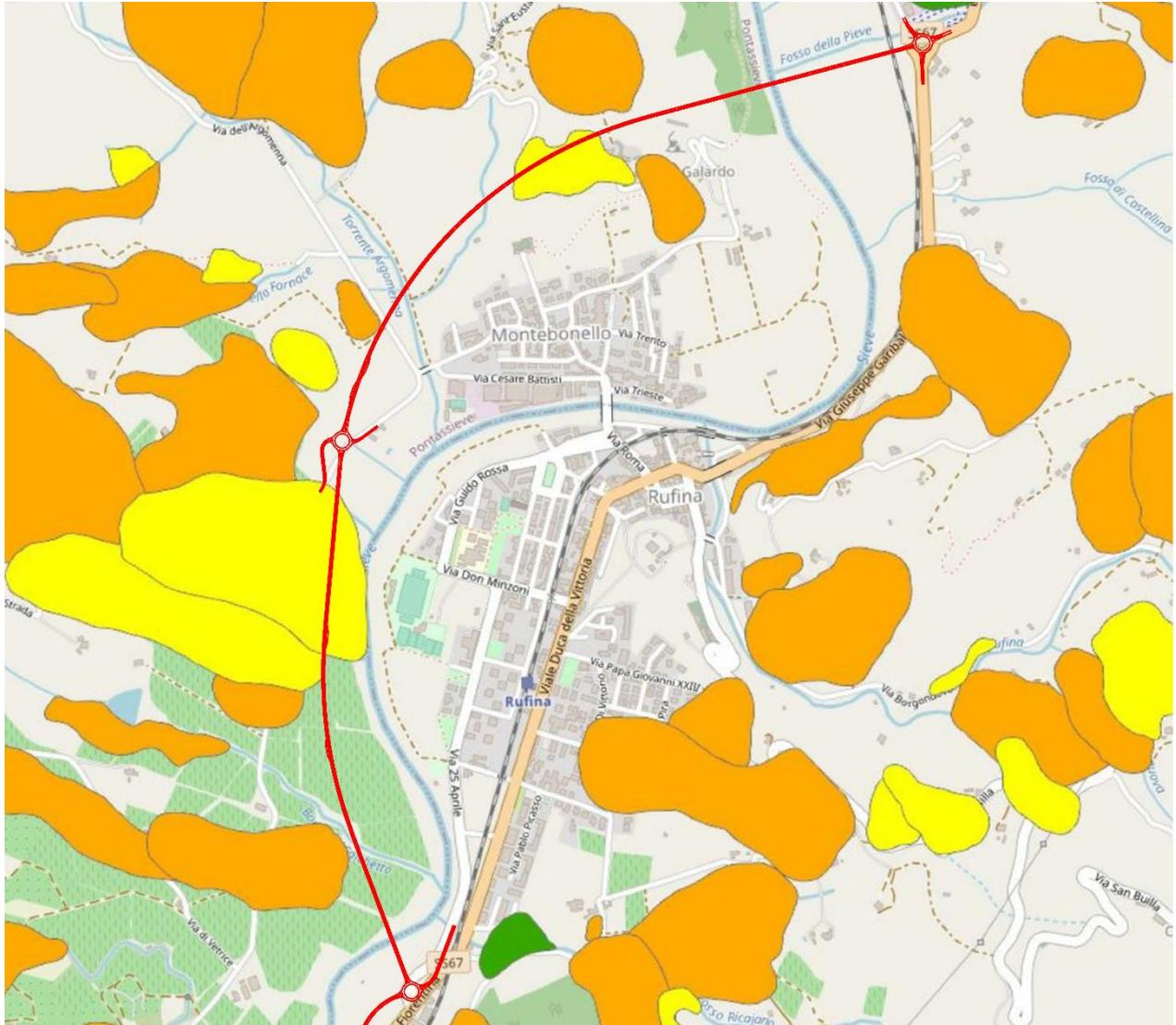
Nell'ambito della revisione dei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI) le classi di pericolosità sono state ridefinite nel seguente modo:

- *Aree instabili interessate da fenomeni di dissesto attivi* di tipo gravitativo, erosivo e/o dovuti all'azione delle acque incanalate negli alvei naturali/artificiali o lungo le pendici (*P4 - molto elevata*).
- *Aree potenzialmente instabili* suddivise in due sottoclassi (*P3 – elevata*):
  - aree non interessate da fenomeni di dissesto attivi ma in cui sono presenti indicatori geomorfologici diretti, quali aree interessate da instabilità in passato e/o segni precursori o premonitori di movimenti gravitativi sulla base dei quali non è possibile escludere la riattivazione dei dissesti (*P3a*);
  - aree interessate da possibili instabilità di tipo gravitativo, erosivo, e/o dovuti all'azione delle acque incanalate negli alvei naturali/artificiali o lungo le pendici, per effetto di condizioni geomorfologiche e fisiche sfavorevole che determinano elevata propensione al dissesto (*P3b*).
- *Aree stabilizzate*, aree stabili interessate tuttavia da litologie e condizioni strutturali e geomorfologiche che possono dar luogo a modifica della loro condizione di stabilità (*P2 – media*)
- *Aree stabili* con condizioni litologiche, strutturali e geomorfologiche aventi caratteri per lo più favorevoli alla stabilità (*P1 – moderata*).

La consultazione della cartografia consente di verificare la corrispondenza, nell'area in esame, delle aree a pericolosità già evidenziate nella cartografia del Piano di bacino del Fiume Arno, dove le aree PF2 corrispondono alle

|  |   |   |                |                                     |                 |                   |
|--|---|---|----------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE<br><br>MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastruttura Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><br><b>ETZVA</b><br>ENERGIA VALLE ABBADIA | <b>sinèrgo</b> | <b>D_VA</b><br>D_VisionArchitecture | REV.<br>A       | FOGLIO<br>6 di 72 |
|  |   |   |                |                                     | Data<br>02/2024 |                   |

aree P2, le aree PF3 corrispondono alle aree P3a, le aree PF4 corrispondono alle aree P4. Pertanto, le interferenze del tracciato con le aree di pericolosità rimangono le medesime già evidenziate in precedenza.



**Figura 1-5** - Rappresentazione cartografica delle aree di pericolosità da dissesti di natura geomorfologica presenti nell'area di progetto (da sito web dell'Autorità di Bacino Distrettuale Appennino Settentrionale – Progetto PAI “Dissesti geomorfologici”)

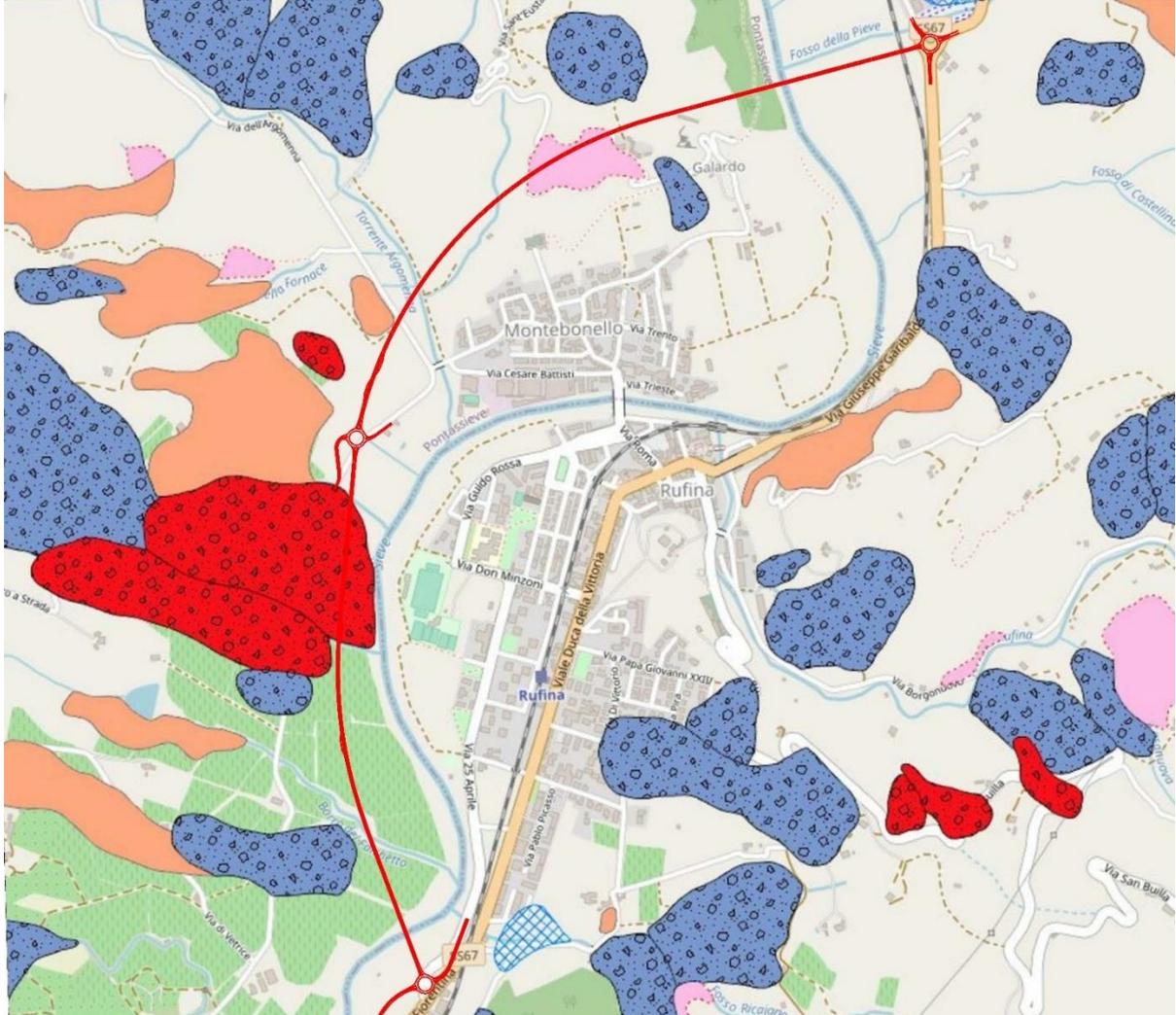
Alla pagina:

<https://geodataserver.appenninosettentrionale.it/portal/apps/webappviewer/index.html?id=14ca15f41e8e4396a1b27d788db98f60>, relativa alla Banca Dati geomorfologica del Progetto di Piano - PAI “dissesti geomorfologici” (cfr. **Figura 1-6** e **Figura 1-7**), è possibile verificare tipologia e grado di attività dei fenomeni franosi già indicati nella cartografia della pericolosità. In particolare, le aree a pericolosità elevata e molto elevata precedentemente indicate come interferenti con il tracciato, corrispondono alle seguenti tipologie di frane:

- area a pericolosità P4 tra le p.k. 0+925 e 1+300 (rilevato/trincea): scivolamento/colata lenta, attiva (S3), che continua a monte come scivolamento/colata lenta, inattiva potenzialmente instabile (S2);
- area a pericolosità P3a alla p.k. 1+770 (Spalla 1 del Viadotto Argomena): area potenzialmente instabile per deformazioni superficiali (FD2);

|  |  |  |                 |        |
|--|--|--|-----------------|--------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  | REV.            | FOGLIO |
|  | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETZVIA</b><br>ENERGIA VALLETTA AMBIENTE | <b>sinèrgo</b>  | A      |
|  |  |  | Data<br>02/2024 |        |

- area a pericolosità P4 tra le p.k. 2+342 e 2+560 (galleria naturale Montebonello): area a franosità diffusa e franosità superficiale attiva (FD3).



**Figura 1-6** - Rappresentazione cartografica dei fenomeni franosi presenti nell'area di progetto (da sito web dell'Autorità di Bacino Distrettuale Appennino Settentrionale - Progetto PAI "Dissesti geomorfologici": Banca Dati geomorfologica)

|  |   |  |                 |                   |
|--|---|--|-----------------|-------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |  | REV.<br>A       | FOGLIO<br>8 di 72 |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVIA s.r.l.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA<br> sinèrgo<br> VA<br>D'VisionArchitecture | Data<br>02/2024 |                   |

- Progetto di PAI "Dissesti Geomorfologici" - Banca dati geomorfologica
- Banca dati geomorfologica
- S3 - Frane di scivolamento e colata lenta - attive
- S2 - Frane di scivolamento e colata lenta - inattive potenzialmente instabili
- S1 - Frane di scivolamento e colata lenta - inattive stabilizzate
- C3 - Frane di crollo - attive
- C2 - Frane di crollo - inattive potenzialmente instabili
- C1 - Frane di crollo - inattive stabilizzate
- R3 - Frane di colata rapida - attive
- R2 - Frane di colata rapida - inattive potenzialmente instabili
- R1 - Frane di colata rapida - inattive stabilizzate
- FD3 - Franosità diffusa e franosità superficiale attiva
- FD2 - Aree potenzialmente instabile per deformazioni superficiali
- DGPV - Deformazione gravitativa profonda di versante
- DM3 - Depressioni morfologiche attive
- DM2 - Depressioni morfologiche potenzialmente instabili
- CON2 - Conoidi di detrito pedemontano e conoidi soggette a debris flow
- CON1 - Conoidi miste detritico-alluvionali
- DOL3 - Dolina attiva
- DOL2 - Dolina inattiva
- ES - Erosione spondale attiva
- FDF - Fascia di dinamica fluviale legata ai processi di erosione attiva
- ND

**Figura 1-7 – Legenda dei fenomeni franosi presenti nel Banca Dati geomorfologica (da sito web dell’Autorità di Bacino Distrettuale Appennino Settentrionale – Progetto PAI “Dissesti geomorfologici”)**

Altri fenomeni franosi indicati come *scivolamento/colata lenta, attiva (S3)*, *scivolamento/colata lenta, inattiva potenzialmente instabile (S2)* e *area potenzialmente instabile per deformazioni superficiali (FD2)* sono presenti a monte del tracciato, non interferenti con il tracciato dell’infrastruttura in progetto.

Si segnalano infine, in prossimità delle rotatorie di inizio e fine tracciato ma non interferenti con il progetto, due *conoidi miste detritico-alluvionale (CON1)*, in parte occupate da insediamenti antropici.

|  |   |                 |                   |
|--|---|-----------------|-------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE<br><br>MANDATARIA<br> MANDANTI<br>   | REV.<br>A       | FOGLIO<br>9 di 72 |
|  |   | Data<br>02/2024 |                   |

## 2 NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Normativa di riferimento

La caratterizzazione e la modellazione geologica del sito sono state eseguite in conformità alla normativa vigente, costituita da:

- Ministero delle Infrastrutture e Trasporti - **Decreto 17 gennaio 2018 - Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”**
- Ministero delle Infrastrutture e Trasporti - **Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP – Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”**

Tale normativa definisce i principi per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, nei riguardi delle loro prestazioni richieste in termini di requisiti essenziali di resistenza meccanica e portanza. Nello specifico si fa esplicito riferimento a quanto riportato al paragrafo 6.1.2 delle N.T.C. 2018 secondo il quale *“le scelte progettuali devono tener conto delle prestazioni attese dalle opere, dei caratteri geologici del sito e delle condizioni ambientali. I risultati dello studio rivolto alla caratterizzazione e modellazione geologica, dedotti da specifiche indagini, devono essere esposti in una specifica relazione geologica.”*

I riferimenti per la normativa PAI vigente sono i seguenti:

- **D.P.C.M. 6 maggio 2005 “Approvazione del Piano di Bacino del fiume Arno, stralcio assetto idrogeologico” (GU n. 230 del 3/10/2005)**
- **Piano di Bacino del fiume Arno, stralcio “assetto idrogeologico” Comitato Istituzionale 11 Novembre 2004 – “Norme di attuazione e allegati” (G.U. n. 248 del 24.10.2005).**

### 2.2 Documenti di Base

- [1] ISPRA-SGN, Carta Geologica D'Italia CARG scala 1:50.000: Foglio 264 “Borgo San Lorenzo” (2015)
- [2] IFFI – Inventario dei fenomeni franosi – Piattaforma IdroGEO
- [3] Autorità di Bacino del Fiume Arno – Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) (2005);
- [4] Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale – Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) – Progetto di Piano - PAI “Dissesti geomorfologici” (2019);
- [5] Regione Toscana - Banca Dati Geomorfologica (2018)
- [6] Comune di Pontassieve (FI): Indagini geologico-tecniche di supporto al Piano Strutturale (2002)
- [7] SIT – Portale del Comune di Rufina - Piano Strutturale Intercomunale Unione dei Comuni Valdarno e Valdisieve (FI) – Supporto geologico (carta geolitologica, carta geomorfologica, carta della pericolosità geologica)

### 2.3 Elaborati di Progetto Definitivo

#### Geologia

- **T00GE01GEORE01** - “Documentazione indagini geognostiche – Monografie dei punti di indagine”
- **T00GE01GEORE02** - “Documentazione indagini geognostiche – Indagini in sito”

|  |   |   |                 |          |
|--|---|---|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |   | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVA s.r.l.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA<br> sinèrgo<br> VA<br>D_VisionArchitecture | A               | 10 di 72 |
|  |   |   | Data<br>02/2024 |          |

- **T00GE01GEORE03** - “Documentazione indagini geognostiche – Indagini geofisiche”
- **T00GE01GEORE04** - “Documentazione indagini geognostiche – Certificati prove geotecniche di laboratorio”
- **T00GE01GEORE05** - “Documentazione indagini geognostiche – Certificati prove geomeccaniche di laboratorio”
- **T00GE01GEORE06** - “Documentazione indagini geognostiche – Certificati analisi chimiche di laboratorio”
- **T00GE01GEORE07** - “Documentazione indagini geognostiche integrative 2023”
- **T00GE01GEORE08** - “Documentazione indagini geognostiche integrative 2023 - Monitoraggio inclinometrico e piezometrico”
- **T00GE01GEORE09** - “Relazione geologica”
- **T00GE01GEOPU01** - “Planimetria con ubicazione delle indagini geognostiche - Tav. 1/3”
- **T00GE01GEOPU02** - “Planimetria con ubicazione delle indagini geognostiche - Tav. 2/3”
- **T00GE01GEOPU03** - “Planimetria con ubicazione delle indagini geognostiche - Tav. 3/3”
- **T00GE01GEOCG01** - “Carta geologica generale”
- **T00GE01GEOCG02** - “Carta geologica di dettaglio – Tav. 1/3”
- **T00GE01GEOCG03** - “Carta geologica di dettaglio - Tav. 2/3”
- **T00GE01GEOCG04** - “Carta geologica di dettaglio - Tav. 3/3”
- **T00GE01GEOCG05** - “Carta geomorfologica - Tav. 1/3”
- **T00GE01GEOCG06** - “Carta geomorfologica – Tav. 2/3”
- **T00GE01GEOCG07** - “Carta geomorfologica – Tav. 3/3”
- **T00GE01GEOCI01** - “Carta idrogeologica – Tav. 1/3”
- **T00GE01GEOCI02** - “Carta idrogeologica – Tav. 2/3”
- **T00GE01GEOCI03** - “Carta idrogeologica – Tav. 3/3”
- **T00GE01GEOFG01** - “Profilo geologico asse principale”
- **T00GE01GEOFG02** - “Viadotto Sieve 1 - Planimetria e profilo geologico”
- **T00GE01GEOFG03** - “Viadotto Argomenna - Planimetria e profilo geologico”
- **T00GE01GEOFG04** - “Viadotto Sieve 2 - Planimetria e profilo geologico”
- **T00GE01GEOSG01** - “Sezioni geologiche trasversali”
- **T00GE01GEOSG02** - “Sezioni geologico-tecniche di dettaglio - Tav.1/2”
- **T00GE01GEOSG03** - “Sezioni geologico-tecniche di dettaglio - Tav.2/2”

**Gestione materie**

- **T00GE02GEORE01** - “Relazione di gestione materie”

|  |   |  |                 |          |
|--|---|--|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |  | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITZIA s.r.l.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA<br> sinèrgo<br> VA<br>D VisionArchitecture | A               | 11 di 72 |
|  |   |  | Data<br>02/2024 |          |

- **T00GE02GEORE02** - “Piano di utilizzo in sito delle terre e rocce da scavo”
- **T00GE02GEOCD01** - “Planimetria ubicativa dei siti di cava e deposito”

#### **Geotecnica**

- **T00GE03GETRE01** - “Relazione geotecnica generale”
- **T00GE03GETRE02** - “Relazione geomeccanica”
- **T00GE03GETFG01** - “Profilo geotecnico asse principale - Tav. 1/4”
- **T00GE03GETFG02** - “Profilo geotecnico asse principale - Tav. 2/4”
- **T00GE03GEOFG03** - “Profilo geotecnico asse principale - Tav. 3/4”
- **T00GE03GEOFG04** - “Profilo geotecnico asse principale - Tav. 4/4”
- **T00GE03GEOFG05** - “Viadotto Sieve 1 – Profilo geotecnico”
- **T00GE03GEOFG06** - “Viadotto Argomenna – Profilo geotecnico”
- **T00GE03GEOFG07** - “Viadotto Sieve 2 – Profilo geotecnico”
- **T00GE03GEOFG08** - “Galleria Montebonello – Profilo geologico-geomeccanico”

#### **Sismica**

- **T00GE04GETRE01** - “Relazione sismica”
- **T00GE04GETCS01** - “Planimetria con classificazione sismica del territorio”

#### **Monitoraggio geotecnico dell’area di frana tra le p.k. 0+925 e 1+300**

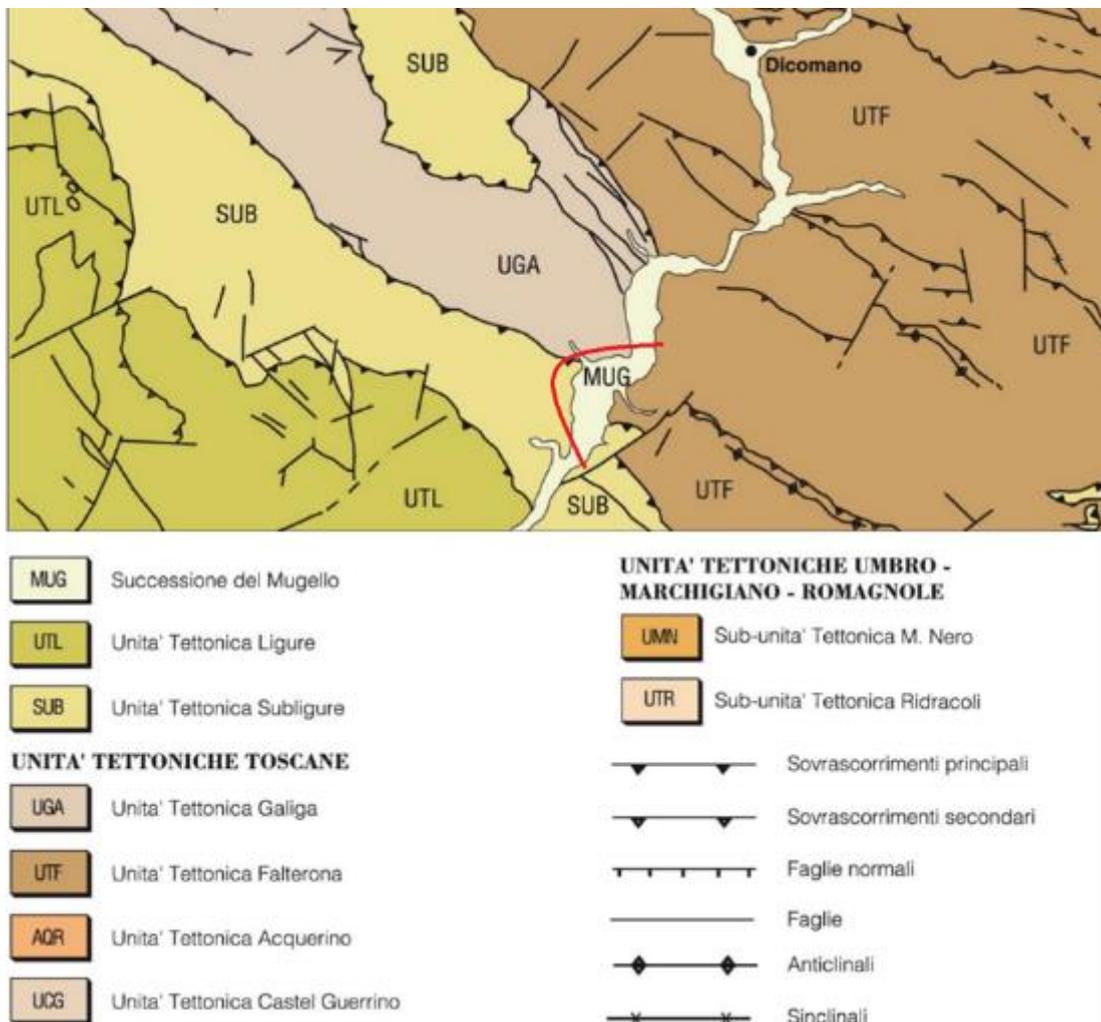
- **T00GE05MOGRE01** - “Relazione tecnica”
- **T00GE05MOGCPU01** - “Planimetria con ubicazione della strumentazione”

|  |  |  |                |                                   |
|--|--|--|----------------|-----------------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  | REV.           | FOGLIO                            |
|  | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETIEM</b><br>ENERGIA TERRITORIO AMBIENTE s.p.a. | <b>sinèrgo</b> | <b>VA</b><br>D'VisionArchitecture |
|  |  |  |                | Data<br>02/2024                   |

### 3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE DELL'AREA

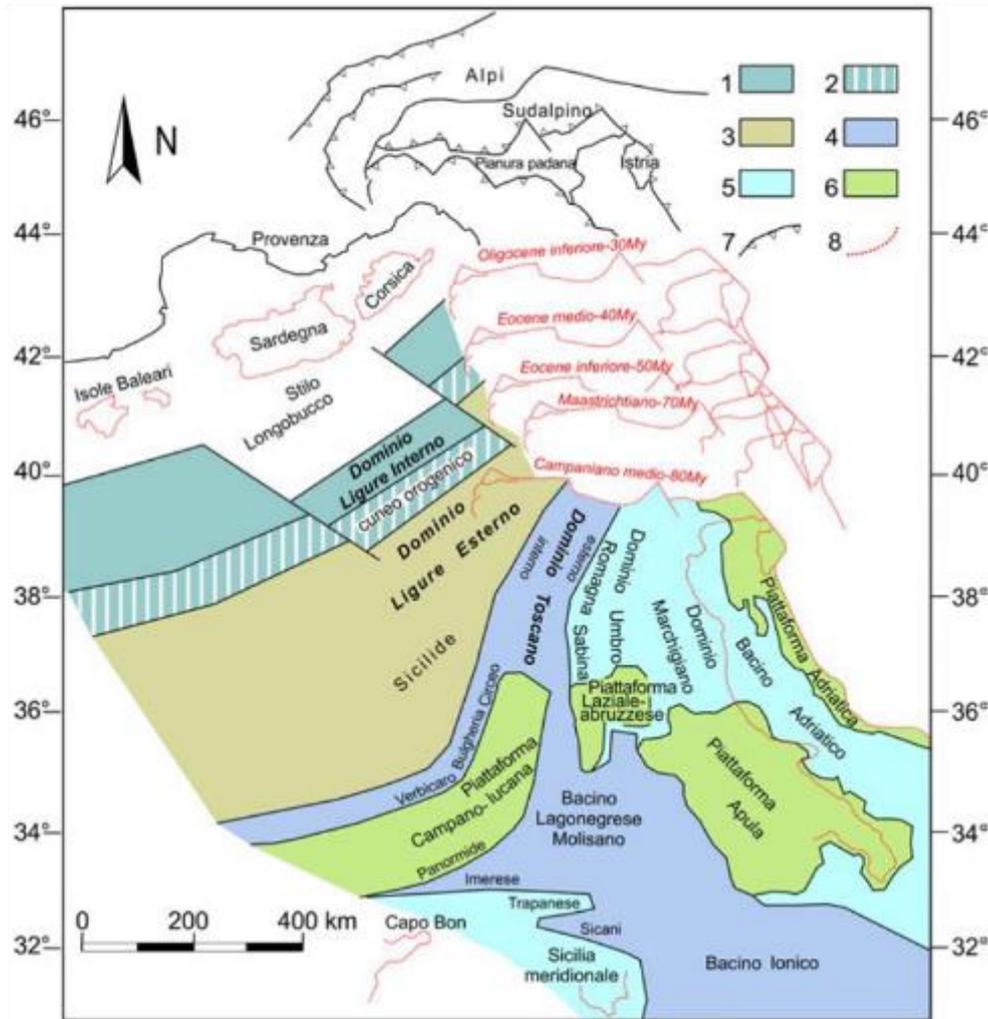
Il segmento toscano dell'Appennino Settentrionale attraversato dall'asse di progetto, caratterizzato notoriamente da una vergenza generale in direzione nord-orientale, riguarda una porzione del bacino idrografico del Fiume Sieve.

Le unità tettoniche, che per definizione sono delimitate da contatti fragili (faglie e sovrascorrimenti) hanno, a scala regionale, la seguente polarità strutturale: l'unità tettonica Subligure (Canéto, SUB) sovrascorre le unità tettoniche Toscane (Galiga e Falterona, UGA) (cfr. **Figura 3-1**). La direzione generale detta anche "appenninica" è orientata circa NW-SE mentre la vergenza è nord-orientale. In riferimento allo sviluppo del tracciato, il sovrascorrimento tettonico interseca l'asse stradale poco prima dell'attraversamento del torrente Argomena: si ipotizza che la superficie sia molto inclinata, circa 65° orientata mediamente in direzione circa NW-SE con immersione a SW.



**Figura 3-1** - Schema tettonico nell'area di progetto: Variante di Rufina, Lotti 2A e 2B (linea rossa) (modif. Foglio geologico 264 "Borgo San Lorenzo", 2010)

Nel Cretacico Superiore il contesto paleogeografico di riferimento (cfr. **Figura 3-2**), comprendeva notoriamente a sud il margine continentale Adria delimitato dall'oceano Tetide; nella porzione occidentale di quest'ultimo la deposizione dei sedimenti avveniva su crosta oceanica, sia nei bacini liguri esterni che nel bacino subligure. La sedimentazione è proseguita sia nel corso della fase di subduzione oceanica che in quella collisionale a seguito delle quali poi si è originata la catena appenninica s.s..



1) aree a crosta oceanica caratterizzate da risedimenti torbiditici a composizione mista carbonatico-siliciclastica. 2) cuneo orogenico eoalpino. 3) aree bacinali a crosta assottigliata o transizionale caratterizzate, nelle aree prossime al cuneo orogenico, da imponenti accumuli gravitativi con blocchi di crosta oceanica e continentale e nelle aree distali da risedimenti torbiditici a composizione mista. 4) aree bacinali con profondità prossima alla CCD, caratterizzate da risedimenti torbiditici intrabasinali. 5) aree bacinali e altofondi sottomarini al di sopra della CCD, a sedimentazione calcarea prevalentemente emipelagica. 6) aree di mare basso o emerse. 7) fronti di sovraccorrimento, anche sepolti, selezionati come elementi di riferimento attuali. 8) Elementi di riferimento che evidenziano il movimento relativo dell'Africa rispetto all'Europa tra 80 e 30 Ma e la posizione delle Baleari e del Blocco Sardo-Corso prima dell'apertura del Bacino Balearico.

**Figura 3-2 - Ricostruzione palinspastica dei domini appenninici (Campaniano Superiore, 80 Ma circa) (modif. Note illustrative - Foglio geologico 249 "Massa Carrara", 2019)**

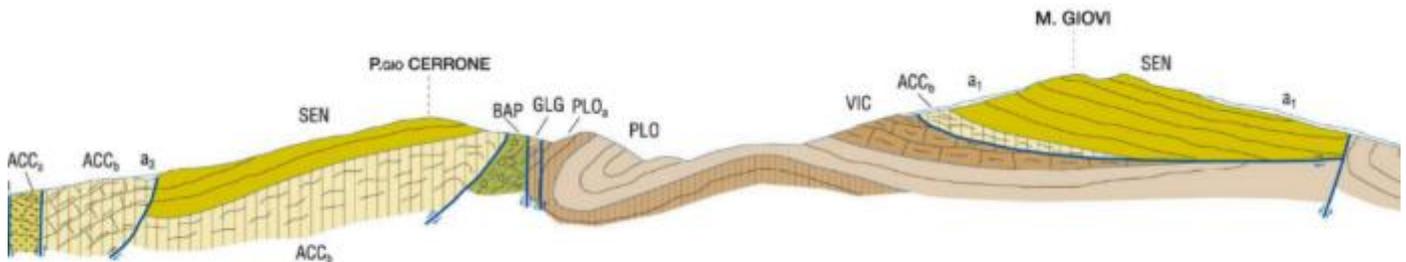
Nell'Oligocene Superiore, a testimonianza di tale raccorciamento, si produssero probabilmente già a livello crostale scaglie tettoniche e la formazione dell'*avanfossa*, che accoglieva la sedimentazione dei depositi torbiditici, in primis quelli ascritti al membro basale delle Arenarie di Falterona (cfr. **Figura 3-4**); contemporaneamente si depositarono le Marne di Galiga (GLG), litologicamente molto differenti. La spiegazione plausibile di tale differenza è che la deposizione di quest'ultime sia avvenuta in un *bacino satellite* più interno e meno profondo della adiacente *avanfossa*, il quale ha accolto anche successivi apporti sedimentari ascritti alle più recenti *Siltiti di Poggiolo Salaiole* (PLO) (Aquitano).

Il *bacino satellite* (*piggy-back*) probabilmente era separato strutturalmente dall'*avanfossa* per mezzo di un alto morfologico, controllato in profondità dalla tettonica fragile in evoluzione (*thrust*). Il proseguire dei fenomeni porta a

|  |  |   |                |                                    |
|--|--|---|----------------|------------------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |   | REV.           | FOGLIO                             |
|  | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETREVA</b> s.r.l.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA | <b>sinèrgo</b> | <b>VA</b><br>D Vision Architecture |
|  |  |   |                | Data<br>02/2024                    |

colmare il bacino satellite, dando così origine alla natura eteropica dei rapporti stratigrafici tra le *Marne di Galiga* (GLG) e le *Siltiti di Poggiolo Salaiolo* (PLO), nonché alla complessa relazione strutturale con il *Membro di Montalto* (FAL3) delle *Arenarie di Monte Falterona*.

La sezione geologica di **Figura 3-3** orientata in direzione SW-NE ubicata alcuni chilometri più a nord-ovest rispetto al tracciato di progetto, risulta nel complesso rappresentativa dello stile geologico-strutturale dell'area, specie nei riguardi delle opere previste in sotterraneo.



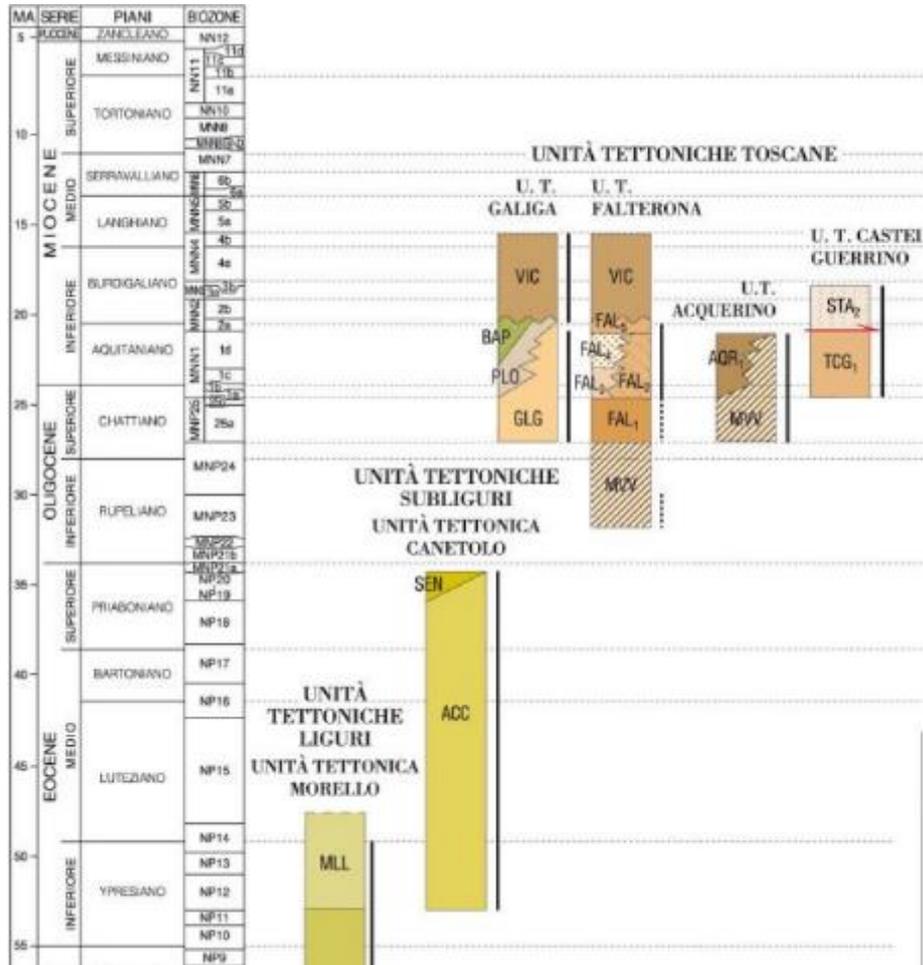
**Figura 3-3** - Sezione geologica orientata in direzione SW-NE, rappresentativa dello stile strutturale dell'area tracciata in posizione più nord-occidentale rispetto al tracciato del progetto della Variante di Rufina (modif. Sezione B-B' - Foglio geologico 264 "Borgo San Lorenzo", 2010)

A partire da sud si individuano faglie verticali, a basso angolo con polarità inversa (*thrust*) che coinvolgono livelli stratigrafici plastici (*Brecce argillose poligeniche*, BAP) permettendo la sovrapposizione delle unità eoceniche (*Argille e Calcari del Canétolo*) su quelle mioceniche (*Marne di Galiga*). Queste strutture danno luogo a raddoppi di spessori e a contatti anomali di origine tettonica. Il sovrascorrimento presente nell'area di progetto, che porta a sovrascorrere l'unità tettonica Subligure sulle unità tettoniche Toscane, potrebbe essersi generato proprio in questo contesto geodinamico. Seguono strutture plicative aperte, modellate entro le unità Oligo-Mioceniche rinvenute in affioramento alla mesoscala, nei pressi del rilievo collinare di Montebonello. Altre strutture fragili subverticali ad andamento "anti-appenninico" ovvero in direzione circa NE-SW, rispetto ai precedenti sovrascorrimenti, esercitano il ruolo di svincolo cinematico nella medesima direzione.

Le unità geologiche che compongono il substrato affiorante lungo il tracciato sono descritte in base alle caratteristiche litologiche e tessiturali, nonché denominate con il rango attribuito dalla nomenclatura stratigrafica (formazioni, membri, litofacies), ma inserite a scala regionale entro unità tettoniche specifiche (unità tettonica Canétolo e unità tettoniche Galiga/Falterona) a sé stanti (cfr. **Figura 3-4**).

Esse possono essere suddivise in due gruppi: nel primo caso si tratta di sedimenti pelagici di piana bacinale con sporadici apporti torbiditici distinti in litofacies, depositi nell'Eocene, nel secondo invece si tratta di sedimenti torbiditici in s.s. che raggiungono un sistema strutturale più articolato (*bacino satellite-avanfossa*), distinti fondamentalmente in membri, depositi tra l'Oligocene superiore e il Miocene medio.

Il primo gruppo costituisce il substrato roccioso presente dalla progressiva iniziale del tracciato fino all'attraversamento del T. Argomenna, mentre il secondo gruppo nella restante parte del tracciato dove costituisce il rilievo collinare di Montebonello, attraversato con una galleria naturale.



**Figura 3-4 - Schema Cronostratigrafico delle unità tettoniche affioranti nell'area di progetto: Variante di Rufina, Lotti 2A e 2B (modif. - Foglio geologico 264 "Borgo San Lorenzo", 2010)**

|  |  |   |                                   |                    |
|--|--|---|-----------------------------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |   | REV.<br>A                         | FOGLIO<br>16 di 72 |
|  | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETIEM</b><br>ENERGIA VERDE AMBIENTE s.p.a. | Data<br>02/2024                   |                    |
|  |  | <b>sinèrgo</b>  | <b>VA</b><br>D_VisionArchitecture |                    |

## 4 UNITÀ STRATIGRAFICHE PRESENTI NELL'AREA DI FRANA

I risultati del rilievo geologico sono rappresentati nella **Carta geologica di dettaglio in scala 1:2000 (3 tavv.)** allegata al progetto, dove sono indicate tutte le unità stratigrafiche riconosciute, suddivise nelle relative unità tettoniche di appartenenza, i depositi superficiali quaternari (depositi di frana, depositi alluvionali, coltri eluvio-colluviali, depositi antropici), i contatti tra le unità geologiche, stratigrafici o tettonici, le giaciture degli strati e le tracce delle sezioni geologiche trasversali.

In particolare, nell'area in oggetto, è presente l'unità delle *Argille e Calcari di Canétolo* (ACC) con il suo orizzonte di alterazione superficiale, nell'ambito del quale si sono sviluppati i *depositi di frana*.

L'unità delle *Argille e Calcari di Canétolo* (ACC) appartiene all'unità tettonica Canétolo (strutturalmente interposta tra l'unità tettonica Morello e l'unità tettonica Falterona), costituendone la porzione basale, di natura prevalentemente argillitica o marnosa, mentre la porzione sommitale, prevalentemente arenacea, è rappresentata dalle *Arenarie di Monte Senario* (SEN) (cfr. **Figura 4-1**).



**Figura 4-1** - Stralcio dello schema cronostatigrafico delle unità tettoniche nell'area di progetto e posizione stratigrafica delle *Argille e Calcari di Canétolo* (ACC) (circolo rosso) (modif. Foglio geologico 264 "Borgo San Lorenzo", 2010).

Le *Argille e Calcari di Canétolo* (ACC) Sono costituite da argilliti variegatae fissili e argille marnose di colore variabile, da verdi a bruno-rossastre e grigie, con intercalazioni di calcilutiti color avana in strati da sottili a spessi, da calcareniti grigio scure, marne calcaree biancastre e grigie e di calcari marnosi a frattura scheggiata. Tali depositi sono stati sottoposti ad una intensa deformazione tettonica con foliazione estremamente pervasiva specie nelle facies argillitiche. Lo spessore complessivo è di circa 200 m. Inoltre, è presente una *litofacies calcarea*, costituita da calcari e calcari marnosi fini, silicei, in strati medi, intercalati a calcareniti in strati da medi a molto spessi e sottili interstrati pelitico-marnosi, marne e marne calcaree grigio chiaro biancastre e calcari marnosi rossastri in strati sottili alternati a argilliti variegatae. Lo spessore complessivo della litofacies è di circa 150 m.

|  |  |  |                 |          |
|--|--|--|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br><b>PRO<br/>ITER</b><br>Progetto<br>Infrastrutture<br>Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><br><b>ETIENZA</b><br>ENERGIA VALLE D'AOSTA<br><b>sinèrgo</b><br>D_VA<br>DVisionArchitecture | A               | 17 di 72 |
|  |  |  | Data<br>02/2024 |          |



**Figura 4-2** - Affioramento di Argille e Calcari del Canétolo, lungo la strada di servizio in località Bassano (q.280 m s.l.m.).

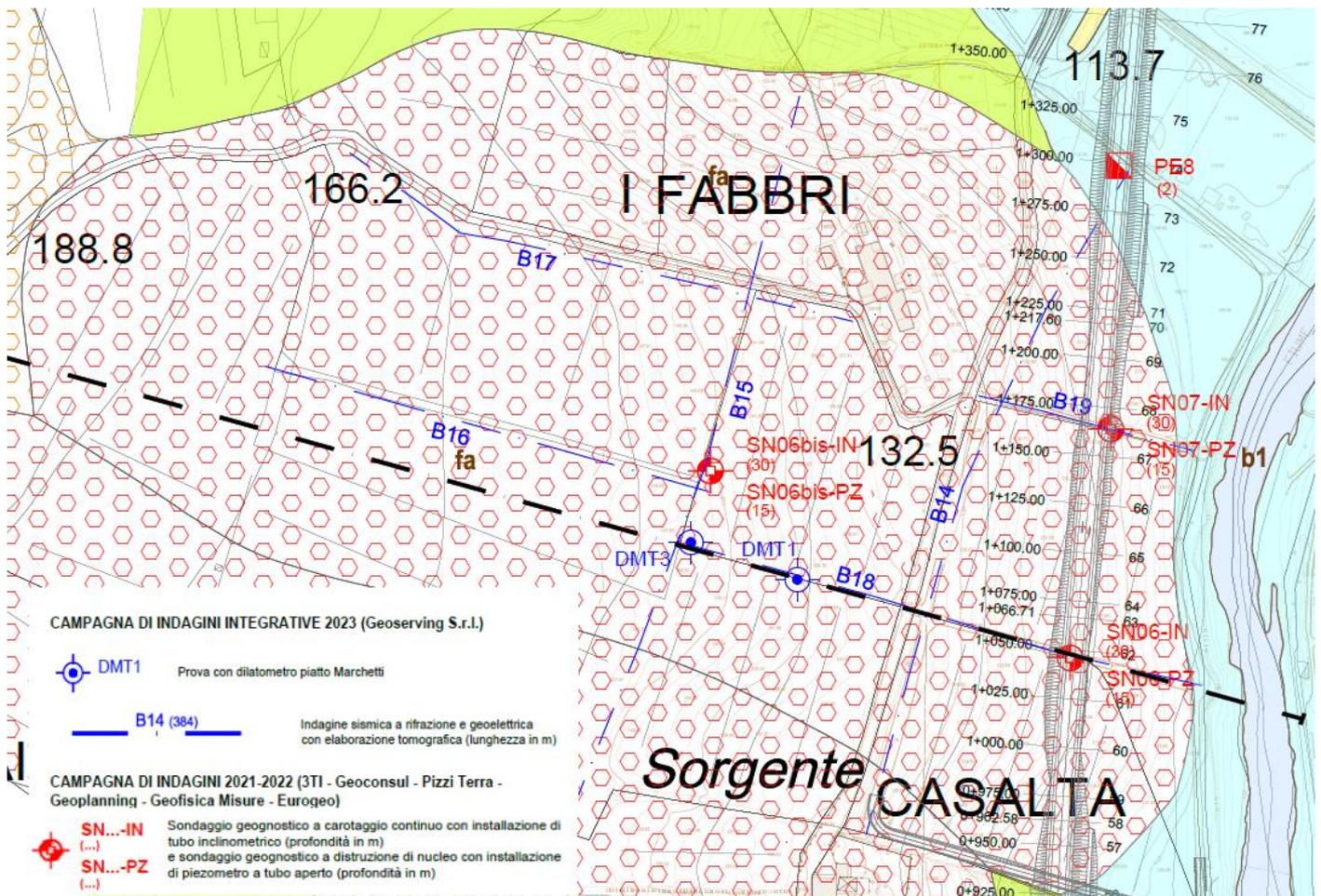


**Figura 4-3** - Affioramento Argille e Calcari del Canétolo, lungo il terrazzo fluviale in destra idrografica del F. Sieve (q.107 m s.l.m.) (scala di riferimento 20 cm)

|  |   |   |                 |                    |
|--|---|---|-----------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ENERGIA VALLE D'AOSTA</b><br><b>sinèrgo</b><br><b>VA</b><br>D VisionArchitecture | REV.<br>A       | FOGLIO<br>18 di 72 |
|  |   |   | Data<br>02/2024 |                    |

## 5 INDAGINI GEOGNOSTICHE

Di seguito vengono descritte le indagini eseguite nell'area della frana tra le p.k. 0+925 e 1+300, relative a due diverse campagne di indagine, la prima nel 2021-2022 e la seconda, integrativa, nel 2023. L'ubicazione di tutte le indagini eseguite nell'area della frana è mostrata nella **Figura 5-1**.



**Figura 5-1** – Ubicazione delle indagini geognostiche eseguite nell'area della frana tra le p.k. 0+925 e 1+300

### 5.1 Campagna di indagine geognostica 2021-2022

La campagna geognostica 2021-2022 è stata realizzata da un'associazione di imprese costituita da 3TI Progetti Italia SpA, Geoconsol Srl, Pizzi Terra Srl, Geoplanning Srl e Geofisica Misure snc.

#### 5.1.1 Piezometri - Geoconsol Srl

La campagna geognostica in oggetto, realizzata nell'anno 2021, ha previsto l'esecuzione di sondaggi a distruzione di nucleo con installazione di tubazioni piezometriche per la misura del livello di falda. In particolare, la ditta Geoconsol Srl ha realizzato nell'area di frana la verticale piezometrica SN07-PZ, spinta fino a 15 m di profondità.

#### 5.1.2 Indagini geognostiche in sito - Eurogeo Srl

La campagna geognostica in oggetto ha previsto l'esecuzione nell'area delle seguenti tipologie di indagini in sito, eseguite dalla ditta Eurogeo Srl nel periodo compreso tra la primavera e l'autunno del 2022:

|  |  |   |  |                 |                    |
|--|--|---|--|-----------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |   |  | REV.<br>A       | FOGLIO<br>19 di 72 |
|  | MANDATARIA<br><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br>  | <br>D_VisionArchitecture | Data<br>02/2024 |                    |

- sondaggi geognostici a carotaggio continuo con prelievo di campioni indisturbati e rimaneggiati, esecuzione di prove in foro (SPT, prove di permeabilità Lefranc) e installazione nei fori di sondaggio a carotaggio di piezometri a tubo aperto oppure installazione di tubi inclinometrici in alluminio per l'esecuzione di misure inclinometriche;
- sondaggi a distruzione di nucleo con installazione di piezometri a tubo aperto;

#### 5.1.2.1 Sondaggi geognostici

Sono stati previsti nell'area n.3 tra sondaggi geognostici a carotaggio continuo da 30 m con installazione di tubo inclinometrico e n.2 sondaggi geognostici a distruzione di nucleo da 15 m con installazione di piezometro a tubo aperto (cfr. anche **Figura 5-1**).

Nella tabella sottostante (cfr. **Tabella 5-1**) sono riepilogate le profondità dei n.5 sondaggi eseguiti e relativa strumentazione installata negli stessi a fine perforazione.

| Sondaggio  | Prof. (m) | Metodo perforazione   | Strumentazione installata |
|------------|-----------|-----------------------|---------------------------|
| SN06-IN    | 30        | Carotaggio continuo   | Inclinometro              |
| SN06-PZ    | 15        | Distruzione di nucleo | Piezometro a tubo aperto  |
| SN06bis-IN | 30        | Carotaggio continuo   | Inclinometro              |
| SN06bis-PZ | 15        | Distruzione di nucleo | Piezometro a tubo aperto  |
| SN07-IN    | 30        | Carotaggio continuo   | Inclinometro              |

**Tabella 5-1** - Sondaggi geognostici eseguiti nell'area di frana: profondità e strumentazione installata

Le perforazioni sono state eseguite tutte a carotaggio continuo, con l'utilizzo del carotiere semplice nei tratti in materiale sciolto (depositi superficiali e substrato roccioso molto alterato) e del carotiere doppio, associato a corona diamantata, nei tratti in roccia. In particolare, l'utilizzo del carotiere doppio ha consentito di misurare per ogni manovra il valore di RQD % (Deere, 1964), ottenuto dalla somma delle lunghezze delle carote lapidee di lunghezza > 10 cm rapportato alla lunghezza della manovra.

Tutti i sondaggi hanno raggiunto il substrato roccioso, costituito nel tratto iniziale del tracciato dalla formazione delle *Argille e Calcari di Canetolo (ACC)*.

#### 5.1.2.2 Prove di resistenza dinamica in foro: Standard Penetration Test (SPT)

All'interno dei fori di sondaggio, durante la loro esecuzione, sono state eseguite delle prove penetrometriche dinamiche SPT, a profondità variabili. In particolare, sono state eseguite n° 8 prove SPT.

Nella sottostante tabella (cfr. **Tabella 5-2**) sono riassunti i risultati delle prove SPT eseguite (R = "rifiuto").

| Sondaggio | SPT [-] | Profondità da p.c. [m] | N <sub>SPT</sub> [colpi/30cm] |
|-----------|---------|------------------------|-------------------------------|
| SN06-IN   | SPT1    | 1,5                    | 9                             |
|           | SPT2    | 3,0                    | 11                            |
|           | SPT3    | 9,0                    | R                             |
| SN07-IN   | SPT1    | 1,5                    | 28                            |
|           | SPT2    | 7,5                    | 15                            |
|           | SPT3    | 9,0                    | 22                            |
|           | SPT4    | 12,0                   | R                             |
|           | SPT5    | 15,0                   | R                             |

|  |  |  |                 |           |                    |
|--|--|--|-----------------|-----------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  |                 | REV.<br>A | FOGLIO<br>20 di 72 |
|  | MANDATARIA<br><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br>   | Data<br>02/2024 |           |                    |

**Tabella 5-2 – Risultati delle prove SPT eseguite nell’area di frana**

In generale i risultati delle prove penetrometriche SPT hanno consentito di verificare, per i terreni di copertura, uno stato di addensamento medio e uno stato di consistenza da medio ad elevato per i primi metri di terreno di alterazione del substrato roccioso.

### 5.1.2.3 Prove di permeabilità in foro

La campagna geognostica in oggetto ha previsto l’esecuzione di n. 2 prove di permeabilità Lefranc che hanno fornito i seguenti risultati (cf. **Tabella 5-3**):

| Sondaggio | Litologia                 | Prof. Prova | K              |
|-----------|---------------------------|-------------|----------------|
| [-]       | [-]                       | [m]         | [m/s]          |
| SN06-IN   | limo sabbioso             | 5,50-6,00   | <b>4,6E-06</b> |
| SN07-IN   | limo con sabbia argilloso | 4,20-4,70   | <b>3,6E-07</b> |

**Tabella 5-3 – Risultati delle prove di permeabilità tipo Lefranc eseguite nell’area di frana**

### 5.1.2.4 Prove dilatometriche in foro

Nel foro di sondaggio SN07 è stata eseguita n. 1 prova dilatometrica in foro per la determinazione dei parametri di deformabilità degli ammassi rocciosi in condizioni di carico (modulo di deformazione) e di scarico (modulo di elasticità). La prova è stata eseguita con tre cicli di carico/scarico con determinazione del modulo corrispondente ad ogni ciclo.

I risultati della prova, eseguita sulla porzione alterata della formazione delle *Argille e Calcari di Canetolo (ACC)*, sono mostrati nella seguente tabella (cfr. **Tabella 5-4**):

| sondaggio | prof. | litologia  | modulo di deformazione |          |          |           | modulo di elasticità |          |            |
|-----------|-------|--|------------------------|----------|----------|-----------|----------------------|----------|------------|
|           |       |  | 1° ciclo               | 2° ciclo | 3° ciclo | globale   | 1° ciclo             | 2° ciclo | 3° ciclo   |
|           |       |  | E [MPa]                | E [MPa]  | E [MPa]  | E [MPa]   | E [MPa]              | E [MPa]  |            |
| SN07-IN   | 21,50 | argillite siltosa grigia, localmente marnosa con sottili intercalazioni calcaree | -                      | 60       | 47       | <b>56</b> | 138                  | 156      | <b>182</b> |

**Tabella 5-4 – Risultati della prova dilatometrica eseguita nel substrato lapideo dell’area di frana**

### 5.1.2.5 Prelievo di campioni di terreno indisturbati e rimaneggiati

Durante la perforazione dei sondaggi nella campagna di indagine eseguita sono stati prelevati n.2 campioni rimaneggiati e n. 7 campioni indisturbati tipo Shelby sui quali sono state previste le seguenti prove:

- aperture e descrizioni geotecniche
- determinazioni del peso di volume naturale
- determinazioni del contenuto naturale d’acqua
- analisi granulometriche complete
- determinazioni dei limiti di consistenza

|  |   |  |                 |          |
|--|---|--|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |  | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio S.r.l. | MANDANTI<br> EITVIA S.p.A.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA<br> sinergo<br> VA<br>D'VisionArchitecture | A               | 21 di 72 |
|  |   |  | Data<br>02/2024 |          |

- determinazioni del peso specifico dei grani
- prove edometriche
- prove triassiali UU
- prove di taglio diretto con determinazione della resistenza di picco
- prove di taglio diretto con determinazione della resistenza residua

I risultati delle prove di identificazione geotecnica eseguite sui campioni indisturbati e rimaneggiati sono mostrati nella seguente tabella (cfr. **Tabella 5-5**):

| Unità geotecnica | Sondaggio | Campione indisturbato | Profondità | Peso specifico dei grani |                      | Peso di volume naturale | Peso di volume secco | Contenuto naturale d'acqua | Limiti di Atterberg |       |     |        | Composizione granulometrica |      |         |            |       | Classificazione CNR-UNI | Classificazione AGI | Classificazione USCS |     |     |     |     |
|------------------|-----------|-----------------------|------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|---------------------|-------|-----|--------|-----------------------------|------|---------|------------|-------|-------------------------|---------------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|
|                  |           |                       |            | $\gamma_s$               | $\gamma_n$           |                         |                      |                            | $w_L$               | $w_p$ | IP  | Ghiaia | Sabbia                      | Limo | Argilla | < 0,075 mm |       |                         |                     |                      |     |     |     |     |
| [-]              | [-]       | [-]                   | [m]        | [kN/m <sup>3</sup> ]     | [kN/m <sup>3</sup> ] | [kN/m <sup>3</sup> ]    | [%]                  | [%]                        | [%]                 | [%]   | [%] | [%]    | [%]                         | [%]  | [%]     | [%]        | [%]   | [%]                     | [%]                 | [%]                  | [%] | [-] | [-] | [-] |
| fa               | SN06IN    | R1                    | 1,80       | 2,00                     | 25,63                |                         |                      |                            | 57                  | 27    | 30  | 23     | 24                          | 27   | 26      | 54         | A 7-6 | L(A,S,G)                | CH                  |                      |     |     |     |     |
| fa               | SN06IN    | I1                    | 4,50       | 4,90                     | 26,05                | 19,27                   | 15,17                | 27,0                       | 48                  | 30    | 18  | 2      | 18                          | 58   | 22      | 82         | A7-5  | L(A,S)(G)               | ML                  |                      |     |     |     |     |
| fa               | SN07IN    | R1                    | 1,00       | 1,40                     | 25,04                |                         |                      |                            | 53                  | 23    | 30  | 43     | 20                          | 20   | 17      | 37         | A7-6  | G(S,L,A)                | GC                  |                      |     |     |     |     |
| fa               | SN07IN    | I1                    | 3,00       | 3,50                     | 26,08                | 19,99                   | 16,77                | 19,2                       | 51                  | 30    | 21  | 17     | 20                          | 45   | 18      | 64         | A7-5  | L(S,A,G)                | MH                  |                      |     |     |     |     |
| fa               | SN07IN    | I2                    | 6,50       | 7,00                     | 26,25                | 20,32                   | 17,37                | 17,0                       | 54                  | 28    | 26  | 7      | 20                          | 48   | 25      | 74         | A7-5  | L(A,S)(G)               | CH                  |                      |     |     |     |     |
| ACC-alt          | SN06IN    | I2                    | 21,60      | 23,10                    | 27,57                | 21,17                   | 18,84                | 12,4                       | 31                  | 22    | 9   | 13     | 46                          | 38   | 3       | A4         | A4    | S,L(A)                  | SC                  |                      |     |     |     |     |
| ACC-alt          | SN07IN    | I3                    | 13,00      | 14,50                    | 26,60                | 21,93                   | 19,70                | 11,3                       | 31                  | 22    | 9   | 2      | 17                          | 71   | 10      | A4         | A4    | L(S,A)(G)               | CL                  |                      |     |     |     |     |
| ACC-alt          | SN07IN    | I4                    | 18,60      | 20,00                    | 26,35                | 20,63                   | 18,78                | 9,8                        | 34                  | 23    | 11  | 25     | 33                          | 30   | 12      | A6         | A6    | S,L,G(A)                | SC                  |                      |     |     |     |     |
| ACC              | SN07IN    | I5                    | 24,55      | 26,00                    | 25,87                | 19,28                   | 17,30                | 11,4                       | 32                  | 25    | 7   | 19     | 70                          | 6    | 5       | 11         | A2-4  | S(G)(L,A)               | SW-SM               |                      |     |     |     |     |

**Tabella 5-5** – Risultati delle prove di identificazione geotecnica sui campioni prelevati nell'area di frana

Le analisi granulometriche eseguite sui campioni rimaneggiati e indisturbati prelevati a profondità da 1 a 7 m circa hanno permesso di classificare i terreni prevalentemente come *limi con argilla sabbiosi deb. ghiaiosi* e *limi argillosi sabbioso ghiaiosi* secondo la Classificazione AGI, CH, MH, ML (GC) secondo la Classificazione USCS e A7-5, A7-6 secondo la Classificazione CNR-UNI 10006. Il valore dell'indice di plasticità dei terreni  $I_p$  è risultato variabile tra 18 e 30, mentre il peso di volume naturale è risultato variabile tra 19 e 20 kN/m<sup>3</sup>.

Sui n. 3 campioni indisturbati sono state eseguite prove di taglio diretto consolidate lente, con determinazione dei valori di picco e residui, che hanno fornito i seguenti valori di resistenza a taglio:

| Campione   | Profondità [m] | Resistenza a taglio di picco |                         | Resistenza a taglio residua |                         |
|------------|----------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
|            |                | $c'_p = 7$ kPa               | $\varphi'_p = 26^\circ$ | $c'_r = 0$ kPa              | $\varphi'_r = 25^\circ$ |
| SN06-IN I1 | 4.50-4.90      | $c'_p = 7$ kPa               | $\varphi'_p = 26^\circ$ | $c'_r = 0$ kPa              | $\varphi'_r = 25^\circ$ |
| SN07-IN I1 | 3.00-3.50      | $c'_p = 7$ kPa               | $\varphi'_p = 34^\circ$ | $c'_r = 0$ kPa              | $\varphi'_r = 28^\circ$ |
| SN07-IN I2 | 6.50-7.00      | $c'_p = 17$ kPa              | $\varphi'_p = 13^\circ$ | $c'_r = 0$ kPa              | $\varphi'_r = 20^\circ$ |

Si deve tuttavia segnalare l'anomalia dei valori di resistenza registrati durante la prova eseguita sul campione SN07-IN I2, nella quale il valore di angolo di attrito di picco è risultato inferiore al valore residuo, a fronte di un valore di coesione di picco più elevata rispetto alle prove eseguite sugli altri due campioni.

Infine, sul campione SN07-IN I2 (6.50-7.00 m) è stata eseguita anche una prova triassiale UU, che ha fornito un valore di  $c_u = 123$  kPa.

|  |  |   |  |                 |                    |
|--|--|---|--|-----------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |   |  | REV.<br>A       | FOGLIO<br>22 di 72 |
|  | MANDATARIA<br><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br>  | <br>D.VisionArchitecture | Data<br>02/2024 |                    |

### 5.1.2.6 Prelievo di spezzoni di carota lapidea

Durante la perforazione dei sondaggi nella campagna di indagine eseguita è stato prelevato n.1 spezzone di carota lapidea su cui sono state previste le seguenti prove:

- determinazione del peso di volume naturale
- misura della velocità sonica
- prova di resistenza a compressione monoassiale con rilievo delle deformazioni assiali e diametrali

I risultati delle prove eseguite sul campione lapideo sono stati riportati nella seguente tabella (**Tabella 5-6**):

| unità geologica | sondaggio | campione | profondità |       | peso di volume                     | velocità onde longitudinali | resistenza a compressione monoassiale | modulo di elasticità secante al 50% |
|-----------------|-----------|----------|------------|-------|------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| [-]             | [-]       | [-]      | [m]        |       | $\gamma_N$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $V_P$<br>[m/s]              | $\sigma_{ci}$<br>[MPa]                | $E_{50}$<br>[GPa]                   |
| ACC             | SN06-IN   | CL1      | 12,00      | 12,40 | 25,6                               | 2247                        | 36,5                                  | 22,73                               |

**Tabella 5-6** – Risultati delle prove geomeccaniche di laboratorio eseguite sul campione lapideo nell'area di frana

## 5.2 Campagna di indagine geognostica integrativa 2023

Nel corso dei primi mesi del 2023 è stata prevista una campagna di indagine geognostica integrativa finalizzata alla caratterizzazione dell'area di frana.

Le indagini previste in questa campagna integrativa sono risultate le seguenti:

- n.6 stendimenti sismici a rifrazione in onde P e n.6 stendimenti sismici a rifrazione in onde SH;
- n.6 stendimenti di geoelettrica in modalità ERT;
- n.4 prove penetrometriche con dilatometro Marchetti;

oltre ad un monitoraggio inclinometrico e piezometrico, con esecuzione di 12 letture di tipo manuale con cadenza mensile della strumentazione precedentemente installata nell'area di frana, ovvero:

- n.3 inclinometri;
- n. 3 piezometri a tubo aperto.

Il report complessivo di tutte le indagini svolte per la suddetta campagna è costituito dall'elaborato di progetto **T00GE01GEORE07** - "Documentazione indagini geognostiche integrative 2023" e dall'elaborato **T00GE01GEORE08** - "Documentazione indagini geognostiche integrative 2023 - Monitoraggio inclinometrico e piezometrico".

### 5.2.1 Sismica a rifrazione in onde P e SH

Sono state previste n.6 prospezioni sismiche a rifrazione in onde P e altrettante in onde SH, con rielaborazione tomografica. Durante la campagna di indagine tali prospezioni sono state realizzate in prossimità delle aree segnalate in potenziale dissesto lungo il tracciato. L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata per le indagini sismiche a rifrazione e per la tecnica tomografica sono state le seguenti:

#### ONDE P

|  |  |  |                 |          |
|--|--|--|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br>  <br>D_VisionArchitecture | A               | 23 di 72 |
|  |  |  | Data<br>02/2024 |          |

- un sistema di energizzazione: la sorgente è costituita da una mazza dal peso di 8 Kg, battente verticalmente su piastra circolare in alluminio del diametro di 18 cm adagiata opportunamente;
- un sistema di ricezione: costituito da geofoni verticali monocomponente di tipo elettromagnetico a bobina mobile e a massa sospesa (peso della massa 12.2gr) con frequenza propria di 40 Hz;
- un sistema di acquisizione dati
- un sistema di trigger: geofono infisso in adiacenza alla piastra, sensibile alle alte frequenze per un preciso innesco della registrazione.

#### ONDE SH

- un sistema di energizzazione: la sorgente è costituita da una mazza dal peso di 8 Kg battente su trave di metallica con battuta coniugata a destra e sinistra;
- un sistema di ricezione: costituito da geofoni orizzontali monocomponente di tipo elettromagnetico a bobina mobile e a massa sospesa (peso della massa 12.2gr) con frequenza propria di 4.5 Hz;
- un sistema di acquisizione dati:
- un sistema di trigger: geofono infisso in adiacenza alla trave, sensibile alle alte frequenze per un preciso innesco della registrazione.

Nella tabella sottostante (cfr. **Tabella 5-7**) vengono riassunte le denominazioni dei lineamenti sismici a rifrazione e relative lunghezze in metri.

| ID linee sismiche a rifrazione | Lunghezza complessiva [m] |
|--------------------------------|---------------------------|
| B14                            | 365.0                     |
| B15                            | 367.5                     |
| B16                            | 240.0                     |
| B17                            | 280.0                     |
| B18                            | 280.0                     |
| B19                            | 120.0                     |

**Tabella 5-7** – Stendimenti sismici a rifrazione in onde P e SH nell'area di frana: denominazione e lunghezze complessive

### 5.2.2 Geoelettrica

Nell'ambito della medesima campagna 2023 sono state realizzate n.6 stendimenti di tipo geoelettrici in modalità ERT.

La strumentazione necessaria per l'esecuzione di indagini ERT è formata schematicamente da:

- un sistema per l'immissione di corrente nel terreno (batteria o generatore di corrente);
- una serie di cavi di connessione multicanale;
- una serie di elettrodi utilizzati, nelle misurazioni, come elettrodi di corrente (A e B) e come elettrodi di potenziale (M e N);
- un georesistivimetro per la misura della corrente immessa e della differenza di potenziale.

La geometria delle indagini geoelettriche in modalità ERT è riassunta nella tabella che segue (cfr. **Tabella 5-8**):

|  |   |  |   |  |                    |
|--|---|--|---|--|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |  |   | REV.<br>A  | FOGLIO<br>24 di 72 |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio S.r.l. | MANDANTI<br> EITVIA S.p.A.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA |  sinèrgo |  VA<br>D Vision Architecture |                    |
|  |   |  |   |  | Data<br>02/2024    |

| ID  | Passo elettrodoico [m] | Risoluzione spaziale | n° elettrodi | Lunghezza complessiva [m] |
|-----|------------------------|----------------------|--------------|---------------------------|
| B14 | 5                      | 2.5                  | 80           | 395.0                     |
| B15 | 5                      | 2.5                  | 80           | 395.0                     |
| B16 | 5                      | 2.5                  | 48           | 235.0                     |
| B17 | 5                      | 2.5                  | 56           | 275.0                     |
| B18 | 5                      | 2.5                  | 56           | 275.0                     |
| B19 | 5                      | 2.5                  | 24           | 115.0                     |

**Tabella 5-8** – Stendimenti geoelettrici in modalità ERT: denominazione e caratteristiche

### 5.2.3 Prove dilatometriche Marchetti

Sono state previste n.4 prove dilatometriche con dilatometro Marchetti. Le prove sono state eseguite impiegando un penetrometro cingolato Pagani statico-dinamico TG63-200, con aste a doppio principio (2P). In ogni ubicazione di prova è stata avviata la procedura di ancoraggio, necessaria ad ottenere dal terreno la reazione per spingere le aste penetrometriche e la punta di misura ed evitare che il penetrometro si potesse sollevare.

In ciascuna ubicazione di prova è stato necessario eseguire l'ancoraggio più volte, poiché la presenza di alcuni corpi rocciosi ne impediva l'esecuzione. La prova DMT 2 ha richiesto ben cinque tentativi di ancoraggio, dopo i quali è stato deciso di rinunciare alla sua esecuzione.

La prova DMT è stata eseguita secondo le procedure standard indicate nei documenti Eurocodice 7, dunque è stato utilizzato un dilatometro piatto a lama di acciaio avente dimensioni 95 x 200 x 15 mm, con il bordo inferiore affilato. Su una faccia è montata una membrana metallica circolare espandibile. La lama viene fatta avanzare nel terreno verticalmente agendo su una batteria di aste. Un cavo elettropneumatico collega la lama con la centralina in superficie. Ad intervalli regolari (generalmente ogni 20 cm) la penetrazione viene arrestata e viene immessa aria compressa, facendo dilatare la membrana contro il terreno. Ad ogni profondità vengono rilevati due valori di pressione e un terzo valore opzionale:

- P0 = pressione necessaria per controbilanciare la pressione del terreno ed iniziare il movimento della membrana (pressione di distacco o lift-off);
- P1 = pressione necessaria per ottenere una dilatazione del centro della membrana contro il terreno di 1.1 mm;
- P2 = pressione misurata al ritorno della membrana nella sua posizione iniziale di chiusura (ottenuta usando valvola di sfiato lento dopo la lettura p1).

L'ubicazione delle prove dilatometriche Marchetti è riportata nella **Figura 5-1**.

### 5.2.4 Monitoraggio inclinometrico e piezometrico

Nell'ambito della campagna integrativa 2023 è stato previsto un piano di monitoraggio inclinometrico e piezometrico dell'area di frana con esecuzione di n.12 letture di tipo manuale con cadenza mensile, da giugno 2023 a giugno 2024, della seguente strumentazione precedentemente installata da ANAS:

- n.3 inclinometri;
- n.3 piezometri a tubo aperto.

|  |  |   |  |        |
|--|--|---|--|--------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |   | REV.   | FOGLIO |
|  | MANDATARIA<br> <b>PRO ITER</b><br>Progetto<br>Infrastrutture<br>Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> <b>EITVIA</b> s.p.a.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA |  <b>sinèrgo</b> | A      |
|  |  |   | Data<br>02/2024  |        |

#### 5.2.4.1 Monitoraggio inclinometrico

Nel campo del monitoraggio geotecnico l'utilizzo della strumentazione inclinometrica, per la misura di movimenti nei terreni rappresenta un sistema consolidato nel tempo ed estremamente diffuso che permette di ottenere misure di elevata precisione, ad un elevato grado di affidabilità, relativamente a profondità, direzione e velocità di scorrimento di una massa di terreno instabile.

La campagna di monitoraggio sarà articolata attraverso l'esecuzione di n.12 letture inclinometriche (n.1 lettura di "zero" e n.11 letture di esercizio) effettuate per perseguire i seguenti fini:

- Individuazione di eventuali movimenti franosi;
- Profondità dei movimenti franosi;
- Velocità ed entità dei movimenti franosi;
- Direzione dei movimenti franosi.

Per l'esecuzione delle letture inclinometriche è stata utilizzata una sonda inclinometrica verticale OG 397 MEMS con sensore MEMS, con fondo scala +/-30° dotata di appositi sensori servoaccelerometrici per la misura dell'inclinazione.

Il sistema di acquisizione è dotato inoltre di:

- Sonda testimone con passo 500 mm;
- Carrucola in acciaio ed INOX ed alluminio;
- Datalogger scarico su rullo con passo 500 mm.

Per la misura di "zero" è stata definita l'orientazione degli assi, per la quale la guida G1 è la direzione che più approssima la direzione di massima pendenza del versante, quindi di un probabile movimento verso valle. In seguito, è stato calcolato l'Azimut, ovvero l'angolo in senso antiorario tra la Guida G1 ed il Nord Magnetico.

Prima di ogni lettura è stata scesa una sonda testimone per il controllo dell'accessibilità del tubo inclinometrico.

Dopo aver atteso la corretta acclimatazione a fondo foro della sonda, essa è stata riportata fino alla testa del tubo ed è stata calata di nuovo per la misura con passo pari a 0.5 m.

I risultati delle misure finora eseguite sui tre inclinometri, con riferimento all'ultima misura del 31/01/2024 (oltre 7 mesi dalla lettura di zero del 14/06/2023) consentono di fare le seguenti osservazioni, con riferimento al grafico del movimento per punti e al grafico del movimento per sommatoria:

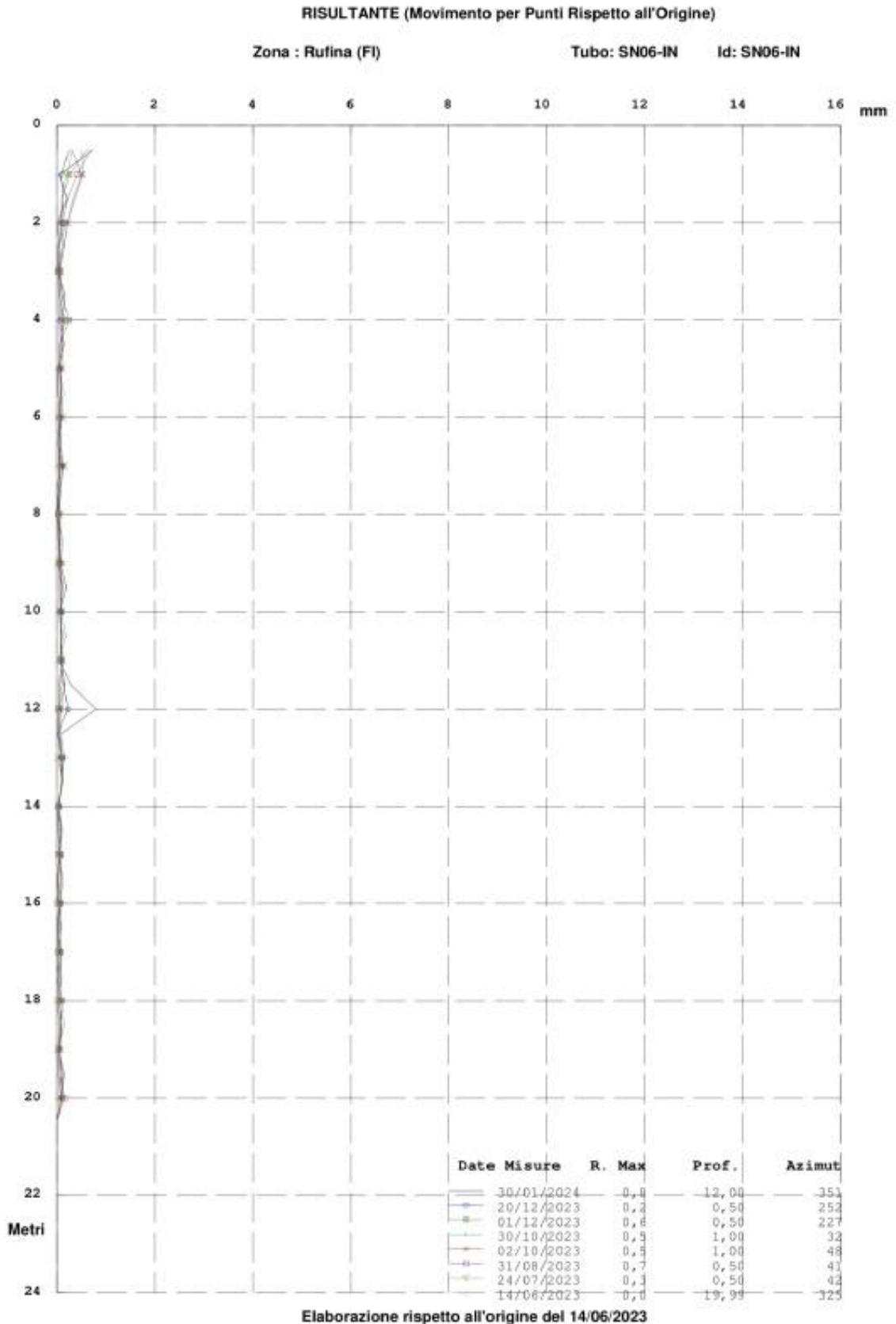
- **SN06-IN** (profondità del tubo inclinometrico 20.5 m): il grafico del movimento per punti rispetto all'origine mostra uno spostamento di 0.8 mm a 12 m di profondità (cfr. **Figura 5-2**), verificatosi solo nell'ultimo mese di misura (dopo il 20/12/2023); conseguentemente, il grafico del movimento per sommatoria mostra attualmente valori di deformazione che, a partire da 12 m, crescono leggermente arrivando ad un valore massimo di circa 2 mm a p.c. (0.5 m di profondità) (**Figura 5-3**); l'azimut di tale deformazione (inteso come l'angolo tra la sommatoria ed Est misurato in senso antiorario) mostra un valore di 331°, corrispondente ad un azimut reale (rispetto a Nord in senso orario) pari a 119° (ESE), eventualmente compatibile con un movimento gravitativo del versante, esposto grosso modo a Est.
- **SN06bis-IN** (profondità del tubo inclinometrico 28.5 m): il grafico del movimento per punti rispetto all'origine mostrava uno spostamento di 0.7 mm a 8 m di profondità già nella prima misura del 24/07/2023 (**Figura 5-4**), tuttavia senza mostrare una progressione di tale spostamento negli ultimi mesi, con un massimo misurato

|  |  |  |   |  |                    |
|--|--|--|---|--|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  |   | REV.<br>A  | FOGLIO<br>26 di 72 |
|  | MANDATARIA<br><br>Progetto<br>Infrastruttura<br>Territoriale s.r.l. | MANDANTI<br> EITVIA s.r.l.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA |  sinèrgo | <br>D_VisionArchitecture |                    |
|  |  |  |   |  | Data<br>02/2024    |

nell'ultima lettura di circa 1.3 mm a 0.5 m di profondità (**Figura 5-5**); l'azimut di tale deformazione mostra un valore di 17°, corrispondente ad un azimut reale pari a 73° (ENE), eventualmente compatibile con un movimento gravitativo del versante, esposto grosso modo a Est.

- **SN07-IN** (profondità del tubo inclinometrico 30 m): in quest'ultimo caso il grafico del movimento per punti rispetto all'origine non mostra spostamenti apprezzabili lungo tutta la verticale (**Figura 5-6**); il grafico del movimento per sommatoria mostra un aumento graduale della deformazione da fondo foro fino a p.c., con un valore massimo misurato nell'ultima lettura di circa 1 mm a 0.5 m di profondità (**Figura 5-7**); pertanto, in quest'ultima verticale non è presente nessun indizio di una eventuale superficie di scivolamento.

### Grafico Movimento per punti rispetto all'Origine



**Figura 5-2 – Inclinometro SN06-IN - Risultante movimento per punti al 30/01/2024**

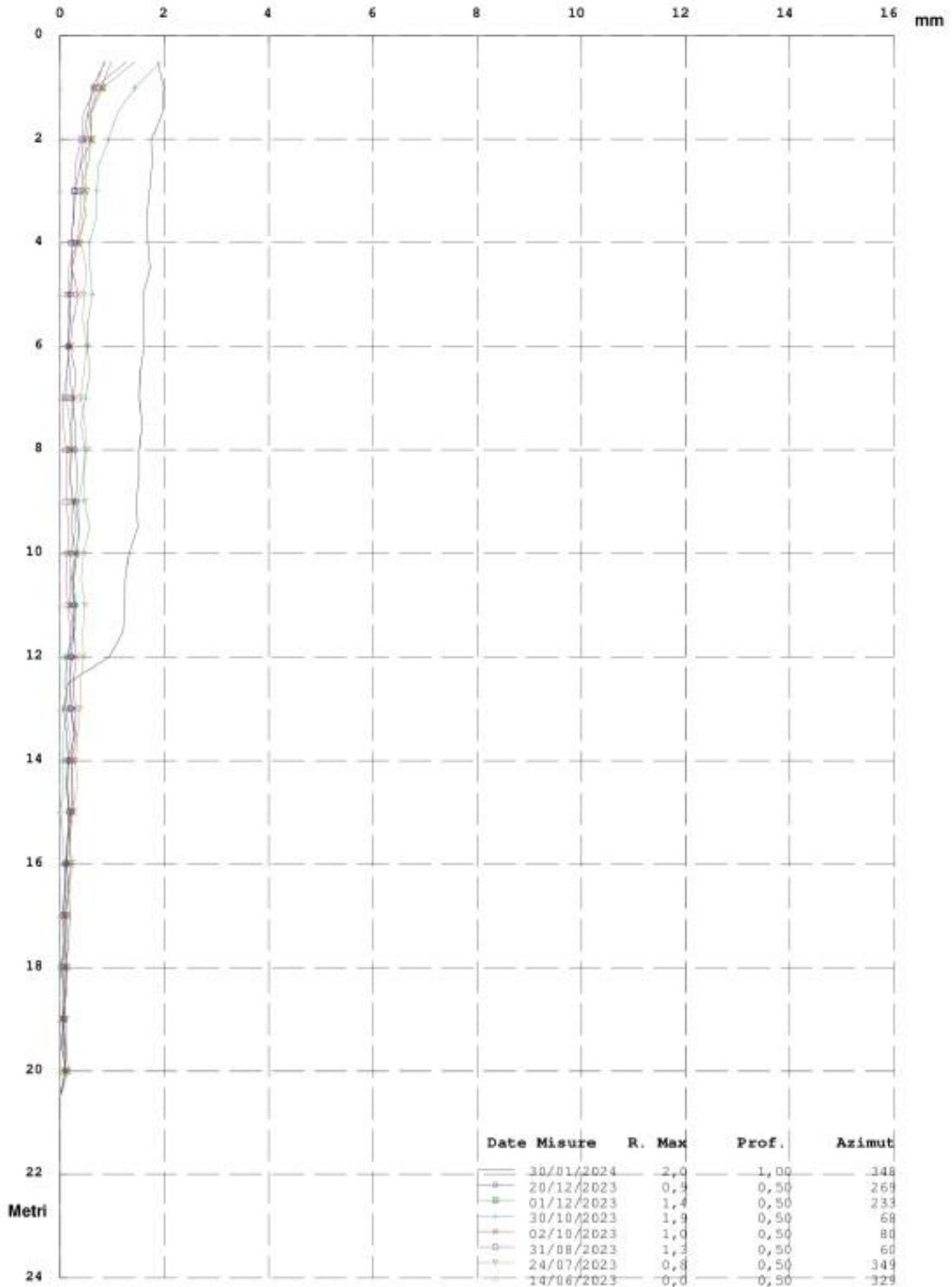
### Grafico Movimento per sommatoria rispetto all'Origine

RISULTANTE (Movimento per Sommatoria)

Zona : Rufina (FI)

Tubo: SN06-IN

Id: SN06-IN



Elaborazione rispetto all'origine del 14/06/2023

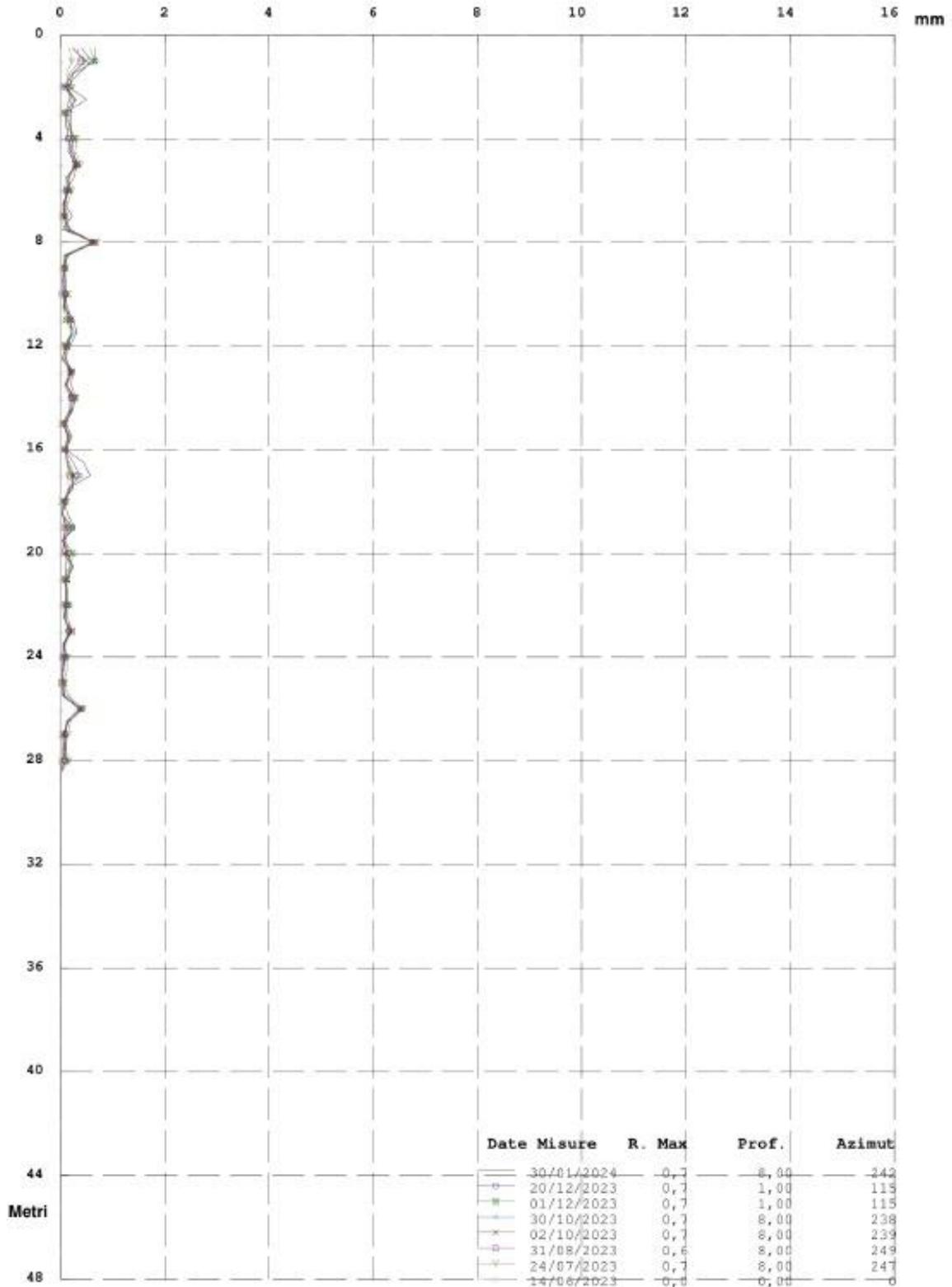
Figura 5-3 – Inclinometro SN06-IN - Risultante movimento per sommatoria al 30/01/2024

### Grafico Movimento per punti rispetto all'Origine

RISULTANTE (Movimento per Punti Rispetto all'Origine)

Zona : Rufina (FI)

Tubo: SN06bis-IN Id: SN06bis-IN



Elaborazione rispetto all'origine del 14/06/2023

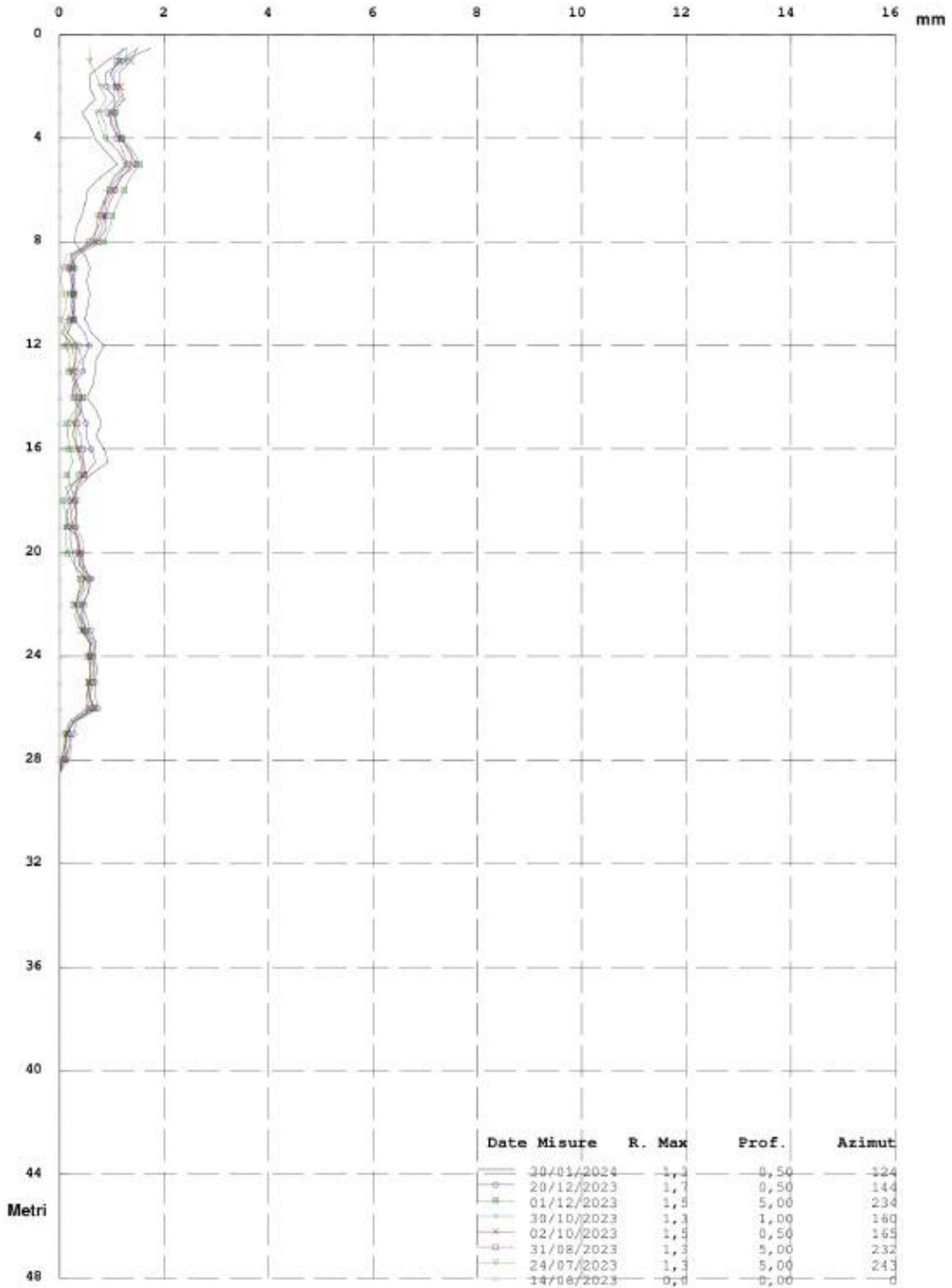
**Figura 5-4** – Inclinatorio SN06bis-IN - Risultante movimento per punti al 30/01/2024

### Grafico Movimento per sommatoria rispetto all'Origine

RISULTANTE (Movimento per Sommatoria)

Zona : Rufina (FI)

Tubo: SN06bis-IN Id: SN06bis-IN



Elaborazione rispetto all'origine del 14/06/2023

Figura 5-5 – Inclinometro SN06bis-IN - Risultante movimento per sommatoria al 30/01/2024

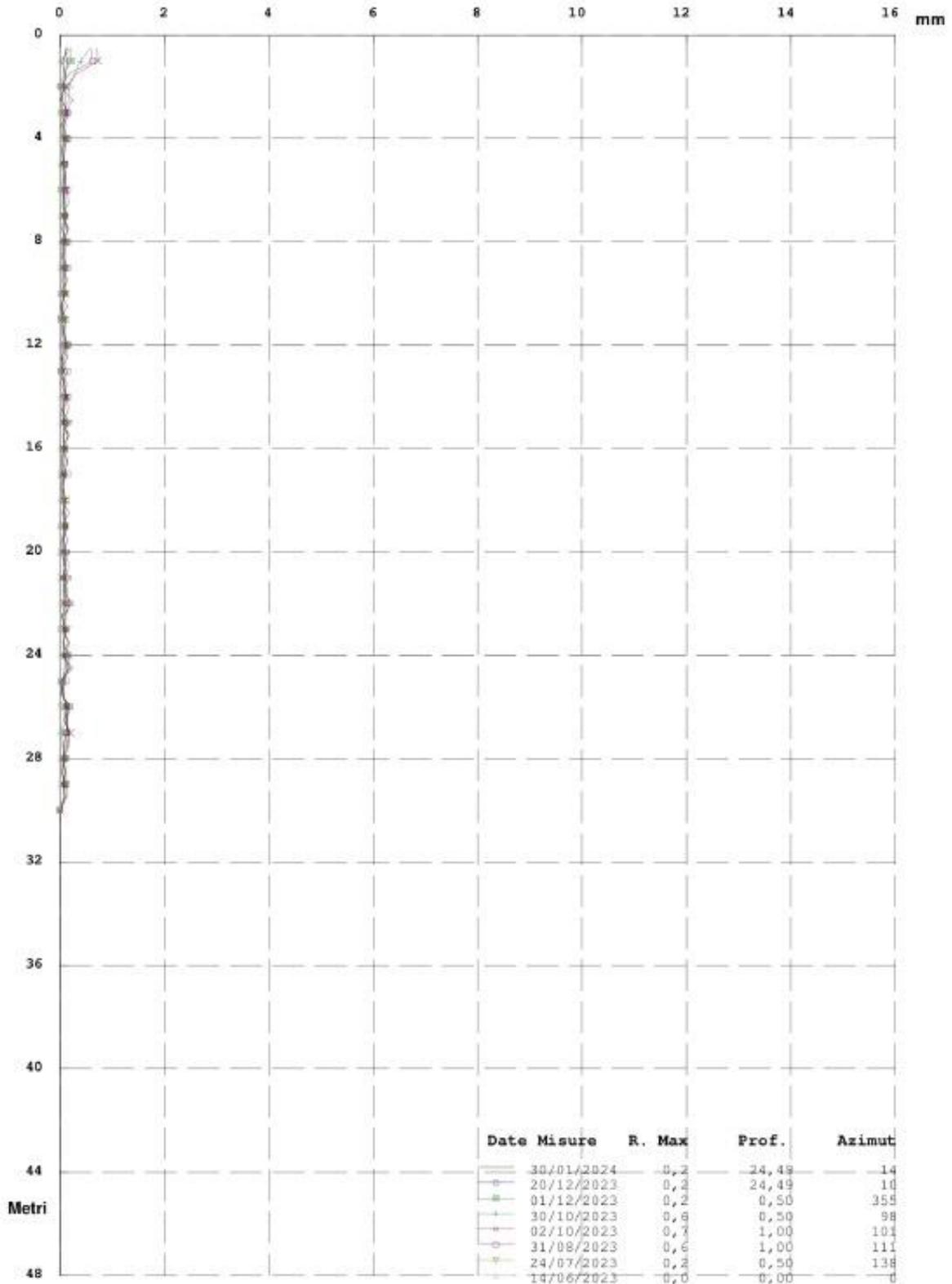
### Grafico Movimento per punti rispetto all'Origine

RISULTANTE (Movimento per Punti Rispetto all'Origine)

Zona : Rufina (FI)

Tubo: SN07-IN

Id: SN07-IN



Elaborazione rispetto all'origine del 14/06/2023

Figura 5-6 – Inclinometro SN07-IN - Risultante movimento per punti al 30/01/2024

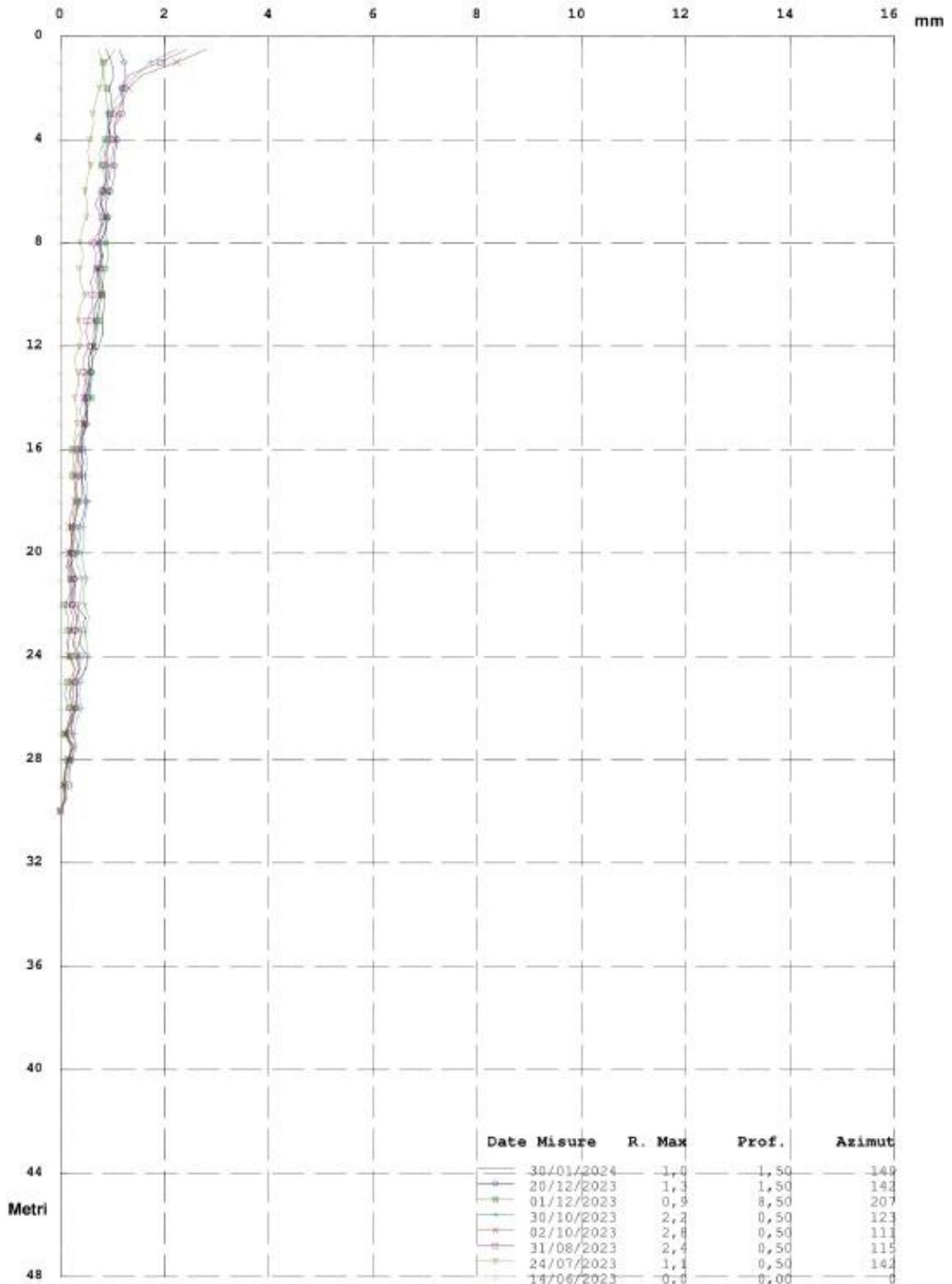
### Grafico Movimento per sommatoria rispetto all'Origine

RISULTANTE (Movimento per Sommatoria)

Zona : Rufina (FI)

Tube: SN07-IN

Id: SN07-IN



Elaborazione rispetto all'origine del 14/06/2023

Figura 5-7 – Inclinometro SN07-IN - Risultante movimento per sommatoria al 30/01/2024

|  |  |  |                |                                     |                    |
|--|--|--|----------------|-------------------------------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  |                | REV.<br>A                           | FOGLIO<br>33 di 72 |
|  | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETIEM</b><br>ENERGIA VERDE ITALIA ARSIZIONE | <b>sinèrgo</b> | <b>D_VA</b><br>D_VisionArchitecture |                    |
|  |  |  |                |                                     | Data<br>02/2024    |

### 5.2.4.2 Monitoraggio piezometrico

Il monitoraggio piezometrico ha lo scopo di intercettare gli eventuali acquiferi presenti nei terreni investigati e di individuare le oscillazioni dei livelli piezometrici nel tempo. Le letture avvengono con l'ausilio di un freatimetro costituito da un cavo montato su un rullo alloggiante il circuito di segnalazione (acustica e luminosa) e da un puntale montato all'estremità inferiore del cavo, che al contatto con l'acqua presente nel piezometro, chiude il circuito che a sua volta attiva il segnale sonoro e luminoso.

Nell'area di frana sono disponibili n. 3 piezometri a tubo aperto, installati in altrettanti fori realizzati a distruzione di nucleo. A partire da giugno 2023 è iniziata una campagna di misure sistematiche a cadenza mensile che si protrarrà per un anno (12 misure): ad oggi risultano disponibili n.8 letture, comprese nel periodo giugno 2023 – gennaio 2024.

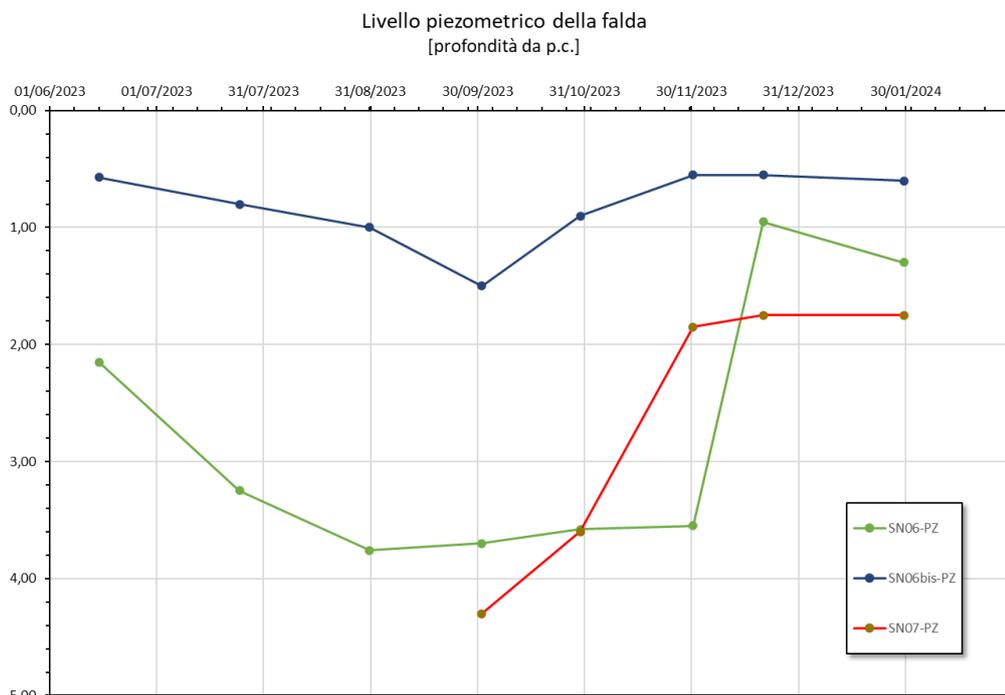
Nella **Tabella 5-9** e nel grafico di **Figura 5-8** sono stati riportati i risultati di tutte le misure finora eseguite.

|            |                   | prof. da bocca pozzo [m] |            |            |            |            |            |            |            |
|------------|-------------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Sondaggi   | Quota bocca pozzo | 15/06/2023               | 25/07/2023 | 31/08/2023 | 02/10/2023 | 30/10/2023 | 01/12/2023 | 21/12/2023 | 30/01/2023 |
| SN06-PZ    | 121,066           | 2,15                     | 3,25       | 3,76       | 3,70       | 3,58       | 3,55       | 0,95       | 1,30       |
| SN06bis-PZ | 145,111           | 0,57                     | 0,80       | 1,00       | 1,50       | 0,90       | 0,55       | 0,55       | 0,60       |
| SN07-PZ    | 118,368           | -                        | -          | -          | 4,30       | 3,60       | 1,85       | 1,75       | 1,75       |

|            |                   | quota [m sl.m.] |            |            |            |            |            |            |            |
|------------|-------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Sondaggi   | Quota bocca pozzo | 15/06/2023      | 25/07/2023 | 31/08/2023 | 02/10/2023 | 30/10/2023 | 01/12/2023 | 21/12/2023 | 30/01/2023 |
| SN06-PZ    | 121,066           | 118,92          | 117,82     | 117,31     | 117,37     | 117,49     | 117,52     | 120,12     | 119,77     |
| SN06bis-PZ | 145,111           | 144,54          | 144,31     | 144,11     | 143,61     | 144,21     | 144,56     | 144,56     | 144,51     |
| SN07-PZ    | 118,368           | -               | -          | -          | 114,07     | 114,77     | 116,52     | 116,62     | 116,62     |

**Tabella 5-9 - Misure del livello piezometrico della falda nell'area di frana**



**Figura 5-8 – Profondità del livello piezometrico della falda nell'area di frana**

|  |  |  |                |                                   |
|--|--|--|----------------|-----------------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  | REV.           | FOGLIO                            |
|  | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETIEM</b><br>ENERGIA TERRITORIO AMBIENTE s.r.l. | <b>sinèrgo</b> | <b>VA</b><br>D_VisionArchitecture |
|  |  |  |                | Data<br>02/2024                   |

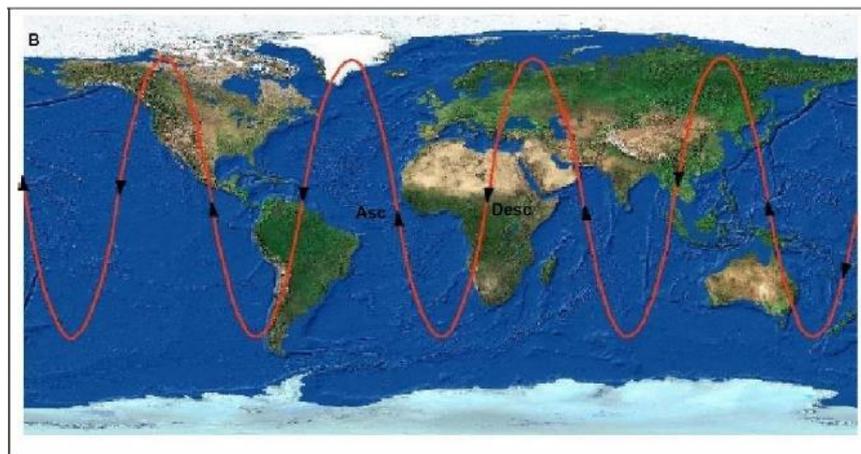
## 6 ANALISI INTERFEROMETRICA DI IMMAGINI RADAR SATELLITARI

### 6.1 Generalità

Facendo riferimento all'Appendice 3 (*Linee guida per l'utilizzo dei dati di deformazione (PS) derivati da analisi multi-interferometrica di immagini radar satellitari*) della Relazione di Piano del Progetto di Piano PAI "Dissesti geomorfologici", di seguito si riporta un estratto con alcune informazioni di carattere generale relative all'analisi interferometrica di immagini radar satellitari e al suo utilizzo nello studio dei dissesti gravitativi di versante.

I sistemi radar satellitari sono sensori di tipo attivo, ossia inviano un segnale che viene riflesso dalla superficie terrestre e ricevuto dal sensore. Rispetto ai più noti sistemi ottici operano con continuità, potendo acquisire dati in presenza di copertura nuvolosa, sia di giorno che di notte. I satelliti radar permettono di misurare spostamenti superficiali del terreno con livelli di precisione millimetrica, grazie alle tecniche di elaborazione dei dati acquisiti, dette interferometriche (*PSInsar* e *SqueeSAR*). Essi rappresentano quindi strumenti efficaci per il monitoraggio da remoto dei fenomeni di deformazione della superficie terrestre misurati in corrispondenza dei *PS* (*permanent scatterers*), ovvero bersagli radar naturali già esistenti sul territorio, contraddistinti da un elevato potere riflettente nei confronti della radiazione elettromagnetica emessa dal satellite e caratterizzati dall'aver una risposta al segnale radar particolarmente stabile durante tutto il periodo di analisi (edifici, rocce esposte, strutture e infrastrutture di vario tipo, ecc.).

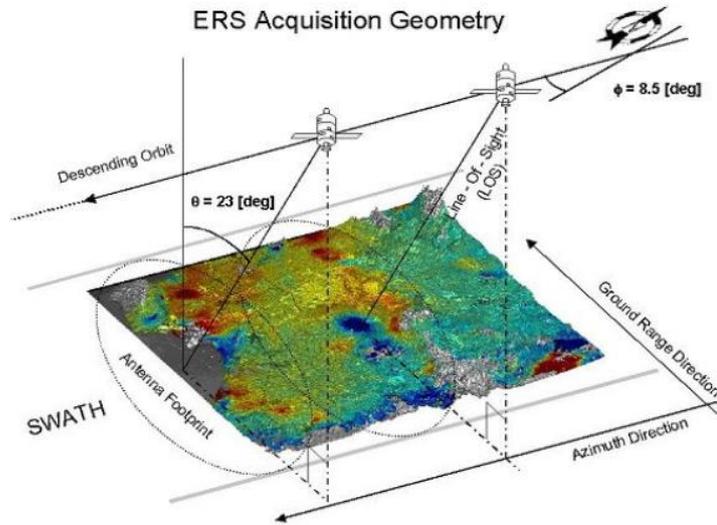
I satelliti con a bordo sistemi di acquisizione radar percorrono orbite eliosincrone lievemente inclinate rispetto ai meridiani (cfr. **Figura 6-1**), illuminando, da una quota di circa 800 km, una striscia di terreno larga circa 100 km (satelliti ERS-ENVISAT).



**Figura 6-1** – Andamento planimetrico delle orbite eliosincrone dei satelliti SAR

La direzione della congiungente sensore bersaglio (LOS) risulta perpendicolare alla direzione dell'orbita (azimut) ed è generalmente inclinata di un determinato angolo rispetto alla verticale, detto off-nadir, che nel caso dei satelliti ERS ed ENVISAT risulta essere di circa 23° (cfr. **Figura 6-2**), mentre nel caso del satellite SENTINEL-1 è di circa 38°.

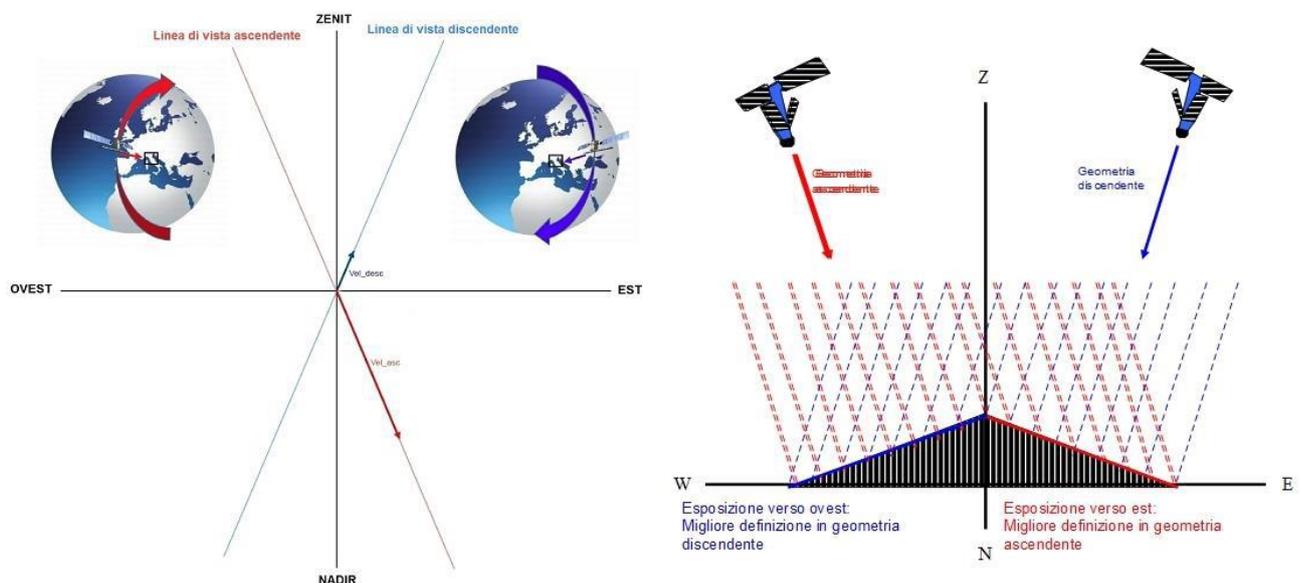
|   |   |  |  |  |                  |                    |
|---|---|--|--|--|------------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br><b>T 00-GE 01-GEO-RE 10</b> | PROGETTAZIONE<br><br>MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. |  | MANDANTI<br><br>   |  | REV.<br><b>A</b> | FOGLIO<br>35 di 72 |
|   |   |  |  |  |                  | Data<br>02/2024    |



**Figura 6-2 – Geometria di acquisizione del satellite ERS in orbita discendente**

La stessa orbita viene ripercorsa dopo un determinato intervallo di tempo, detto *tempo di rivisitazione*, consentendo così di acquisire dati relativi alla stessa scena al suolo in tempi differenti. Dalla combinazione della rotazione terrestre con le orbite eliosincrone dei satelliti risulta che la stessa area della superficie terrestre viene illuminata dalla radiazione radar sia durante un passaggio del satellite da nord verso sud, denominata orbita *discendente*, sia durante un passaggio del satellite da sud verso nord, denominata orbita *ascendente*. La possibilità di acquisire dati sulla stessa scena nelle due geometrie è molto importante perché permette di analizzare uno stesso fenomeno da due diversi punti di osservazione, permettendo di superare alcuni inconvenienti legati ad orientazione e geometria del versante.

Infatti, il sensore radar si trova collocato sulla destra rispetto al senso di marcia del satellite e questo fa sì che in geometria ascendente la scena sia osservata da ovest verso est, mentre in geometria discendente sia osservata da est verso ovest.



**Figura 6-3 – Schematizzazione delle due geometrie di acquisizioni dei satelliti con strumentazione SAR**

|   |   |                      |  |
|---|---|----------------------|--|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br><b>T 00-GE 01-GEO-RE 10</b> | PROGETTAZIONE<br><br>MANDATARIA<br> <b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l.<br><br>MANDANTI<br>   | REV.<br><br><b>A</b> | FOGLIO<br><br>36 di 72<br><br>Data<br><br><b>02/2024</b> |
|---|---|----------------------|--|

Inoltre, I sistemi radar satellitari, tendono infatti a risolvere meglio situazioni dove il versante viene osservato con bassa inclinazione rispetto alla linea di vista del satellite e per tale motivo i versanti esposti ad est vengano generalmente risolti meglio in geometria ascendente, mentre quelli esposti ad ovest in geometria discendente, pertanto avere le immagini acquisite in entrambe le geometrie permette di migliorare notevolmente la risoluzione geometrica del fenomeno che vogliamo esaminare.

Un limite delle tecniche di elaborazione dell'informazione interferometrica è dovuto alla particolare geometria di acquisizione delle immagini: dato che gli spostamenti vengono registrati lungo la linea di vista del satellite (*LOS*) che risulta essere orientata circa in direzione EO, tale geometria di acquisizione non comporta particolari problemi nell'analisi di movimenti prevalentemente verticali come fenomeni di subsidenza del terreno, mentre nello studio dei dissesti franosi, dove la componente orizzontale può assumere un carattere predominante, più la direzione del movimento si discosta dalla direzione EO più viene sottostimata la velocità di spostamento, fino ad arrivare alla situazione estrema di un movimento orizzontale con direzione NS che non viene assolutamente rilevato dal satellite.

L'altro limite della tecnica interferometrica è invece dovuto al fatto che se la differenza di cammino ottico tra due successive acquisizioni risulta essere maggiore o uguale alla lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica utilizzata, o ad un suo multiplo, nel generale l'interferogramma si perde il contributo intero della fase e lo spostamento viene sottostimato. Questo fenomeno, denominato "equivocazione di fase", fa sì che tra due successive acquisizioni sia possibile esaminare in modo soddisfacente solamente movimenti relativamente lenti che, considerate le lunghezze d'onda generalmente utilizzate, risultano caratterizzati da velocità medie di spostamento in direzione LOS minori di 5-6 cm/anno e spostamenti relativi tra due acquisizioni minori di 1 cm (per ERS ed ENVISAT). Nel caso di fenomeni franosi risultano quindi monitorabili in modo efficace fenomeni di scivolamento e colamento lento, mentre fenomeni di crollo-ribaltamento o colate rapide non possono essere esaminati in maniera soddisfacente. Viste le basse velocità di movimento risultano inoltre ben rilevabili fenomeni di subsidenza e segni precursori di sprofondamenti catastrofici tipo sinkholes.

Il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ha inserito nel "Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale" (PST-A) anche l'elaborazione interferometrica delle immagini radar acquisite su tutta Italia dai satelliti ERS1 e ERS2 nel periodo 1992-2000 e dal satellite ENVISAT nel periodo 2003-2010, oltre all'elaborazione di alcune immagini acquisite dal sistema satellitare COSMO Sky-Med nel periodo 2011-2014. I dataset puntuali dei singoli PS, riportanti sia velocità medie che serie storiche degli spostamenti, possono essere infine richiesti in formato vettoriale tramite il Geoportale Nazionale.

Nel caso della velocità media, il limite di sensibilità della tecnica interferometrica è stimabile in circa +/- 2 mm/anno, per cui i PS che presentano valori di velocità compresi in tale intervallo possono essere considerati stabili, ovvero non adeguatamente risolvibili con tale tecnica di analisi.

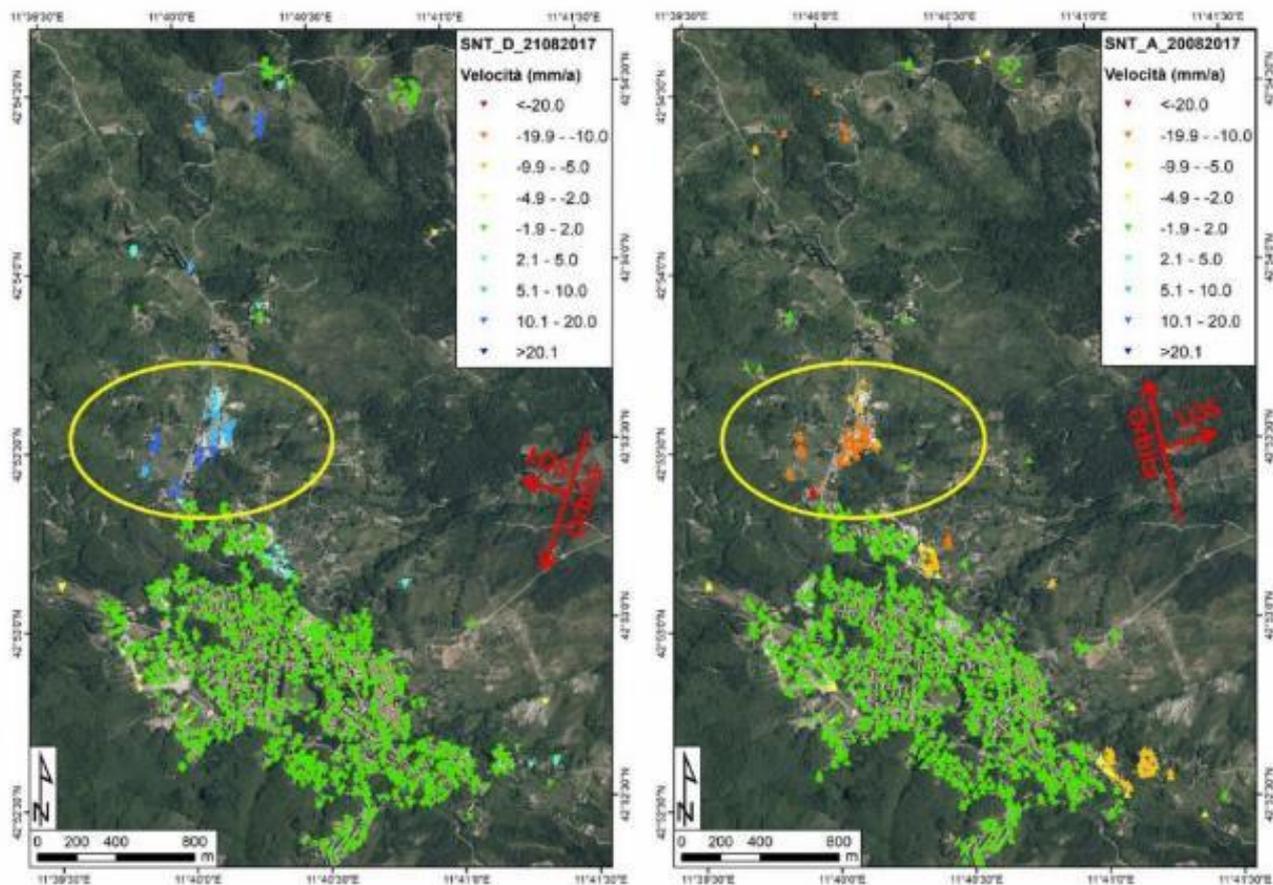
La velocità media dei PS corrisponde al coefficiente angolare della retta di regressione lineare degli spostamenti registrati alle diverse date di acquisizione su tutto il periodo di analisi.

La stima della velocità media di una certa area può essere effettuata sia in modalità ascendente (osservando la scena da ovest verso est), sia in modalità discendente (osservando la scena da est verso ovest). I vettori velocità e spostamento relativo assegnati ai singoli PS nelle due geometrie sono orientati lungo la rispettiva linea di vista del satellite e possono trovarsi in condizione di allontanamento o avvicinamento rispetto ad esso. Quando si avvicinano, al

|  |   |  |                |                                   |                 |                    |
|--|---|--|----------------|-----------------------------------|-----------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE<br><br>MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><br><b>ETIEM</b><br>ENERGIA VERDE AMBIENTE | <b>sinèrgo</b> | <b>VA</b><br>D.VisionArchitecture | REV.<br>A       | FOGLIO<br>37 di 72 |
|  |   |  |                |                                   | Data<br>02/2024 |                    |

modulo viene convenzionalmente assegnato segno positivo, mentre se si allontanano il segno è negativo. L'esame congiunto delle due set di valori di velocità per una stessa area ci permette quindi di capire subito se la componente prevalente del movimento è verticale o orizzontale. Nel primo caso, infatti, registreremo due set di valori di velocità media molto simili tra loro, sia come modulo che come verso, mentre nel caso di moto orizzontale i vettori avranno valore assoluto del modulo molto simile ma segno opposto.

La seguente figura (cfr. **Figura 6-4**) mostra un esempio di area di frana con velocità di segno opposto nelle orbite ascendente e discendente che indicano, movimento della frana verso Est (in un versante esposto a Est dove il satellite ascendente indica allontanamento, ovvero valori negativi di velocità, lungo la LOS, mentre il satellite discendente indica avvicinamento, ovvero valori positivi, lungo la LOS).



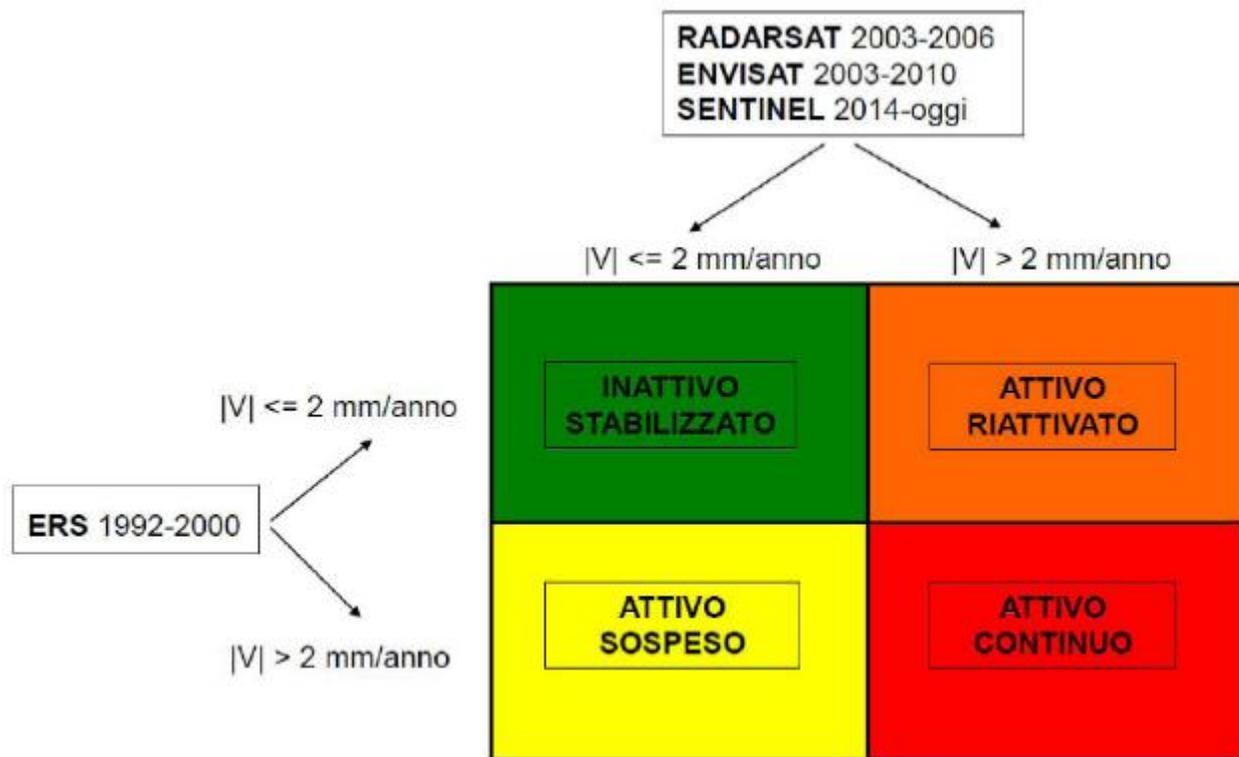
**Figura 6-4** – Esempio di velocità dei PS con segno opposto nelle orbite ascendente e discendente (versante esposto a Est)

Dagli anni '90 ad oggi si sono succedute diverse generazioni di satelliti differenti per caratteristiche di geometria di volo e cadenza temporale di tempo di rivisitazione, per tale motivo generalmente i dati acquisiti con diversi sensori satellitari non possono essere integrati tra loro a causa delle diverse caratteristiche di acquisizione (polarizzazione, banda utilizzata, orientamento della LOS). Possono comunque essere effettuati dei confronti qualitativi tra i trend di deformazione registrati da differenti satelliti su una stessa area, in modo da ottenere indicazioni di massima sullo stato di attività di un fenomeno in periodi temporali diversi.

A titolo di esempio si riporta un confronto tra i valori assoluti di velocità media annua registrati dal satellite ERS nel periodo 1992-2000 con quelli registrati dai satelliti RADARSAT-1 nel periodo 2003-2006, ENVISAT nel periodo 2003-

|  |  |  |                |                                   |
|--|--|--|----------------|-----------------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  | REV.           | FOGLIO                            |
|  | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETIEM</b><br>ENERGIA TERRITORIO AMBIENTE s.r.l. | <b>sinèrgo</b> | <b>VA</b><br>D'VisionArchitecture |
|  |  |  |                | Data<br>02/2024                   |

2010 e SENTINEL-1 a partire dal 2014. Tale confronto ha permesso di costruire una matrice di attività dove è possibile discriminare tra lo *stato inattivo stabilizzato*, se risultano velocità inferiori ai 2 mm/anno per tutti i satelliti considerati, e lo *stato attivo*, dove invece almeno uno dei satelliti considerati mostra evidenti segni di movimento. In particolare, lo stato attivo può a sua volta essere ulteriormente suddiviso in “*continuo*”, se tutti i satelliti registrano velocità superiori ai 2 mm/anno, “*sospeso*”, dove soltanto i dati ERS mostrano velocità superiori ai 2 mm/anno e “*riattivato*”, dove invece i dati ERS risultano stabili ma uno o più degli altri satelliti individuano aree con velocità superiori ai 2 mm/anno.



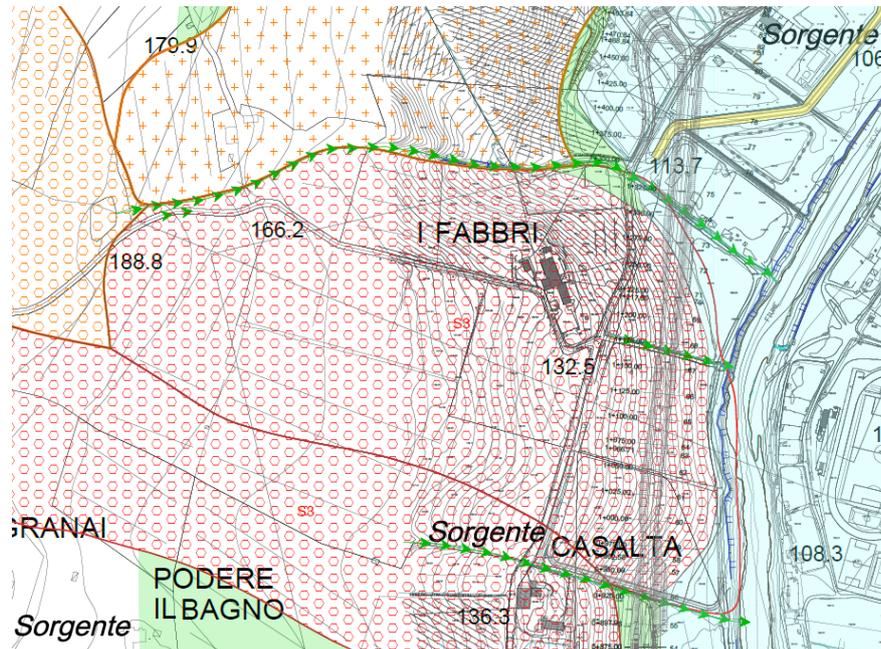
**Figura 6-5** – Matrice dello stato di attività ottenuta dal confronto tra velocità dei PS registrate in diversi periodi temporali (da: Progetto di Piano PAI “Dissesti geomorfologici” – Relazione di Piano - Appendice 3: Linee guida per l'utilizzo dei dati di deformazione (PS) derivati da analisi multi-interferometrica di immagini radar satellitari)

## 6.2 Analisi dei valori di velocità dei PS nell'area di frana tra le p.k. 0+925 e 1+300

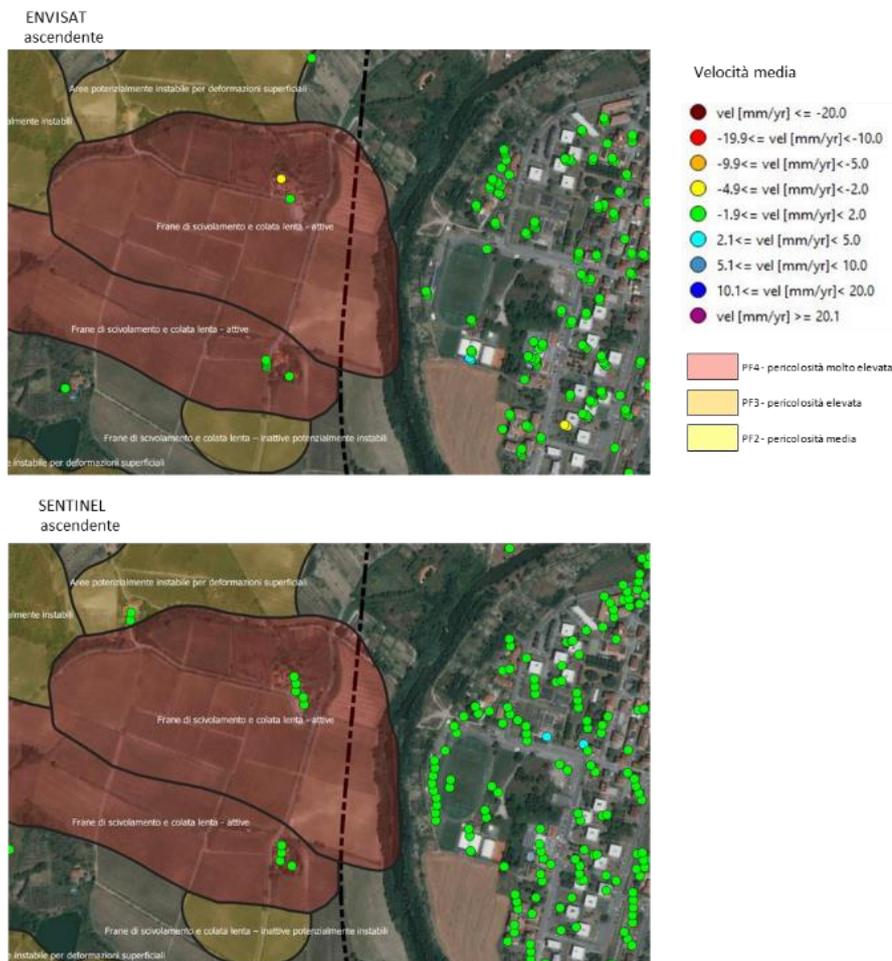
In questa zona è segnalata dal PAI una *frana di scivolamento e colata lenta attiva (S3)* e *pericolosità geomorfologica molto elevata (P4)*, interferente direttamente con il tracciato tra le p.k. 0+925 e 1+300 circa, dove non sono previste opere d'arte particolari ma solo una sezione di rilevato/trincea. Nell'area il substrato della frana è riferibile alle *Argille e Calcari di Canétolo (ACC)*.

In corrispondenza del piede della frana, dove sono presenti alcuni edifici, sono presenti sia alcuni PS che indicano una sostanziale stabilità (velocità comprese tra  $-1.9 \div 2$  mm/anno registrate con Envisat ascendente e Sentinel sia ascendente che discendente), sia un unico PS che indica una velocità compresa tra  $-4.9$  e  $-2$  mm/anno (Envisat ascendente). Considerando che il versante in esame è esposto ad Est e che quindi la traiettoria in grado di meglio descrivere l'eventuale movimento è quella ascendente, il dato di velocità relativo satellite Envisat ascendente deve essere considerato con particolare attenzione.

|   |   |  |                        |                    |
|---|---|--|------------------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T 00-GE 01-GEO-RE 10</b> | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br> MANDANTI<br>   |  | REV.<br><b>A</b>       | FOGLIO<br>39 di 72 |
|   |   |  | Data<br><b>02/2024</b> |                    |

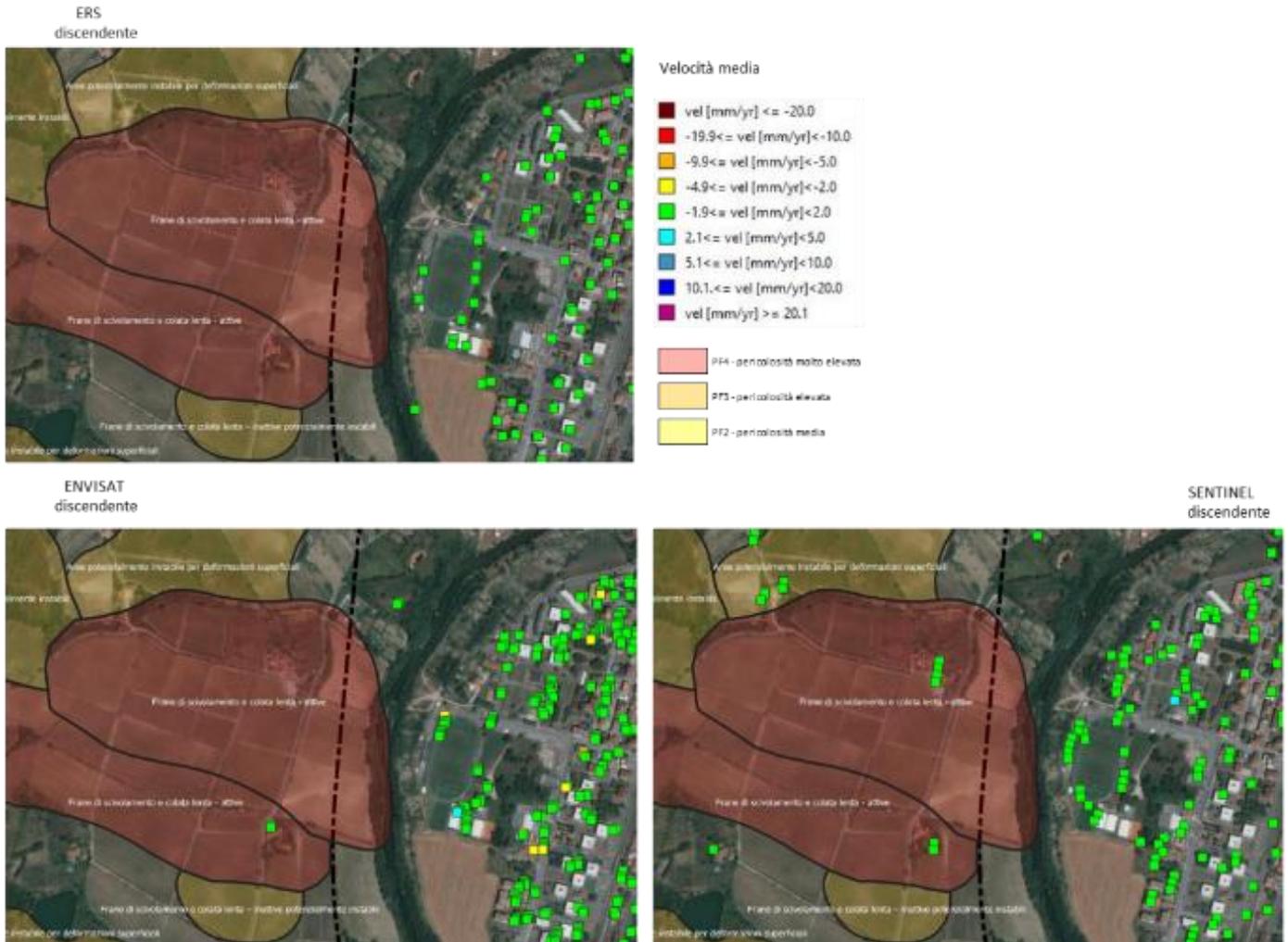


**Figura 6-6** – Frana di scivolamento e colata lenta attiva (S3) e pericolosità geomorfologica molto elevata (P4), ubicata tra le progressive p.k. 0+925 e 1+300 circa



**Figura 6-7** – Distribuzione dei PS e relativi valori di velocità nell'areale della frana di scivolamento e colata lenta attiva (S3) e pericolosità geomorfologica molto elevata (P4) - traiettoria ascendente

|   |   |  |                  |                        |
|---|---|--|------------------|------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T 00-GE 01-GEO-RE 10</b> | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br> MANDANTI<br>   |  | REV.<br><b>A</b> | FOGLIO<br>40 di 72     |
|   |   |  |                  | Data<br><b>02/2024</b> |



**Figura 6-8** – Distribuzione dei PS e relativi valori di velocità nell’areale della frana di scivolamento e colata lenta attiva (S3) e pericolosità geomorfologica molto elevata (PF4) - traiettoria discendente

### 6.3 Analisi fotointerpretativa stereoscopica e rilievo geomorfologico

Una volta esaminata tutta la documentazione di cui ai punti precedenti (IFFI, Banca Dati geomorfologica, PAI Bacino del Fiume Arno, Progetto di Piano PAI . Dissesti geomorfologici, Dati interferometrici Geoportale Nazionale e Regione Toscana), è stata eseguita un’analisi fotointerpretativa stereoscopica delle immagini aeree relative al volo eseguito per la realizzazione della base aerofotogrammetrica di progetto dell’infrastruttura, seguita da un rilievo geomorfologico di campagna, eseguito in contemporanea con il rilievo geologico delle unità affioranti di cui al capitolo 5 della presente relazione.

Tale attività ha consentito di verificare morfologia e stato di attività dei dissesti indicati nella cartografia degli Enti e di riconoscere tutte le altre forme legate sia all’azione della gravità, sia legate allo scorrimento delle acque superficiali, sia legate a processi di natura antropica. La cartografia di tali forme e processi è rappresentata nella **Carta geomorfologica in scala 1:2000 (3 tavv.)** allegata al progetto (cfr. stralcio in **Figura 6-6**).

|  |  |  |                 |          |
|--|--|--|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br>  <br>D_VisionArchitecture | A               | 41 di 72 |
|  |  |  | Data<br>02/2024 |          |

## 7 CARATTERIZZAZIONE SISMICA

### 7.1 Stati limite nei confronti delle azioni sismiche

Al paragrafo 3.2.1 del D.M. 17/01/2018 vengono definiti gli stati limite nei confronti delle azioni sismiche, sia di esercizio che ultimi, riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti.

Gli stati limite di esercizio (SLE) sono:

- **Stato Limite di Operatività (SLO):** a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e le apparecchiature rilevanti in relazione alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
- **Stato Limite di Danno (SLD):** a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali e orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Gli stati limite ultimi (SLU) sono:

- **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV):** a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- **Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC):** a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento **PVR**, cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati, sono (Tab. 3.2.I D.M. 17/01/2018):

| Stati Limite              |     | <b>PVR0: Probabilità di superamento nel periodo di riferimento <math>V_R</math></b> |
|---------------------------|-----|---|
| Stati Limite di Esercizio | SLO | 81%   |
|                           | SLD | 63%   |
| Stati Limite Ultimi       | SLV | 10%   |
|                           | SLC | 5%  |

|  |   |   |                 |          |
|--|---|---|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |   | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVIA s.r.l.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA<br> sinèrgo<br> VA<br>DVisionArchitecture | A               | 42 di 72 |
|  |   |   | Data<br>02/2024 |          |

## 7.2 Periodo di riferimento per l'azione sismica

L'accelerazione orizzontale massima attesa al sito dipende dal periodo di riferimento considerato per la definizione dell'azione sismica. Si ritiene di attribuire alla infrastruttura in progetto, ai sensi della tabella 2.4.I del D.M. 17.01.2018, una vita nominale  $V_N \geq 50$  anni nonché una classe d'uso IV. In base alla tabella 2.4.II il coefficiente d'uso vale  $C_U = 2$ .

Pertanto, il periodo di riferimento per l'azione sismica vale:

$$V_R = V_N C_U = 50 \times 2.0 = 100 \text{ anni}$$

## 7.3 Parametri sismici

In base a quanto descritto nel D.M. 17/01/2018 la *pericolosità sismica* in un generico sito deve essere descritta:

- in termini di accelerazione orizzontale massima  $a_g$  e dei parametri che permettono di definire gli spettri di risposta nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale;
- in corrispondenza dei punti di un reticolo, denominato reticolo di riferimento, i cui nodi non distano più di 10 km.

Le forme spettrali previste dal D.M. 17/01/2018 sono definite, su sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione dei tre parametri:

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima del terreno;
- $F^0$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T_c^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Nelle norme tecniche NTC 2018 sono forniti, secondo un reticolo di riferimento e per differenti intervalli di riferimento, i parametri sismici  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$  per un sito rigido orizzontale (come definiti al paragrafo 3.2) necessari per la determinazione delle azioni sismiche.

Qualora l'area in esame non ricada in corrispondenza dei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri di interesse possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento, mediante la seguente espressione:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

in cui:

- $p$  è il valore del parametro di interesse nel punto in esame;
- $p_i$  è il valore del parametro di interesse nell' $i$ -esimo punto della maglia elementare contenente il punto in esame;
- $d_i$  è la distanza del punto in esame dall' $i$ -esimo punto della maglia suddetta.

|  |   |   |                 |          |
|--|---|---|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |   | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVIA s.r.l.<br>ENERGIA VALLE D'AGRO<br> sinèrgo<br> VA<br>D'VisionArchitecture | A               | 43 di 72 |
|  |   |   | Data<br>02/2024 |          |

Di seguito si riportano i valori dei parametri sismici  $a_g$  agli SLV, ricavati mediante il programma "Spettri NTC ver.1.0.3.xls", disponibile sul sito <http://www.cslp.it/cslp/>, inserendo le coordinate geografiche di inizio tracciato, fine tracciato e dei punti più significativi in corrispondenza delle principali opere d'arte maggiori.

| Comune      | Zona sismica         | Opera                    | $a_g$ [SLV; TR=949] |
|-------------|----------------------|--------------------------|---------------------|
| Rufina      | 2<br>[ $a_g=0.216$ ] | Inizio tracciato         | 0,207               |
| Pontassieve | 3<br>[ $a_g=0.183$ ] | Viadotto 1 - Spalla Nord | 0,208               |
|             |                      | Rotatoria                | 0,210               |
|             |                      | Viadotto 2 - Spalla Nord | 0,220               |
|             |                      | Galleria - Imbocco Sud   | 0,220               |
|             |                      | Galleria                 | 0,222               |
|             |                      | Galleria - Imbocco Nord  | 0,223               |
| Rufina      | 2<br>[ $a_g=0.216$ ] | Viadotto 3 - Spalla Nord | 0,224               |
|             |                      | <b>Fine tracciato</b>    | <b>0,224</b>        |

I valori riportati sono stati ottenuti in funzione del periodo di ritorno  $T_R$  e di una vita di riferimento  $V_R=100$  anni.

Nell'ottica di una caratterizzazione sismica adeguata, sulla base della tipologia di rilievo e delle opere attraversate dal tracciato, si è scelto di utilizzare i dati dei parametri sismici relativi a fine tracciato, che forniscono, per l'area in esame, i valori di  $a_g$  più elevati. In particolare, si riportano di seguito i valori dei parametri sismici  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T^*_{c(s)}$  ricavati mediante il programma "Spettri NTC ver.1.0.3.xls" da utilizzare in fase progettuale:

#### Fine tracciato (11.498576- 43.837345)

|     | $T_R$ (anni) | $a_g$ (g) | $F_0$ | $T^*_{c}$ (s) |
|-----|--------------|-----------|-------|---------------|
| SLO | 60           | 0,079     | 2,461 | 0,272         |
| SLD | 101          | 0,098     | 2,441 | 0,278         |
| SLV | 949          | 0,224     | 2,377 | 0,303         |
| SLC | 1950         | 0,280     | 2,409 | 0,314         |

## 7.4 Categoria sismica dei suoli di fondazione

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi, come indicato nel paragrafo 7.11.3 del D.M. del 17/01/2018. In assenza di tali analisi o per una prima stima, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di *categorie di sottosuolo* di riferimento, identificate in funzione dei valori della velocità di propagazione  $V_s$  (velocità sismiche delle onde di taglio).

|  |   |   |                 |          |
|--|---|---|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |   | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVIA s.r.l.<br>ENERGIA VALLE D'AGOSTO | A               | 44 di 72 |
|  |   |   | Data<br>02/2024 |          |

Con riferimento alla vigente normativa “*Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni*” (D.M. 17/01/2018) la classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche e ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{S,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

con:

- $h_i$  spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{S,i}$  velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
- N numero di strati;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{S,eq}$  è definita dal parametro  $V_{S30}$ , ottenuto ponendo  $H=30$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite nella Tab.3.2.II del NTC 2018, riportata di seguito.

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

| Categoria | Caratteristiche della superficie topografica  |
|-----------|---|
| A         | <i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>   |
| B         | <i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>  |
| C         | <i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>   |
| D         | <i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i> |
| E         | <i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>  |

#### 7.4.1 Definizione delle categorie di sottosuolo per la progettazione

Dai risultati delle prospezioni sismiche eseguite nelle diverse campagne di indagine, ovvero dei risultati delle prospezioni sismiche down-hole eseguite in corrispondenza del Viadotto Sieve 1 in progetto, nonché dei risultati delle indagini sismiche a rifrazione con elaborazione tomografica e misura delle  $V_s$  eseguite nell'area di frana (cfr. punto 8.3.3), è stato possibile definire per tutta l'area di competenza delle Argille e Calcari di Canèto (ACC):

|  |   |  |                 |          |
|--|---|--|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |  | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVIA s.r.l.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA<br> sinergo<br> D_VA<br>D_VisionArchitecture | A               | 45 di 72 |
|  |   |  | Data<br>02/2024 |          |

- una **categoria di sottosuolo di tipo B**, corrispondente a *rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{S,eq}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s*, nei seguenti tratti/opere:

#### 7.4.2 Coefficiente di amplificazione topografica

In base alle condizioni topografiche presenti in sito (T1= superficie pianeggiante e T2 =pendii con inclinazione media  $i > 15^\circ$ ), si possono adottare i seguenti valori del coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$  (cfr. Tabella 3.2.V del D.M. 17/01/18):

| Categoria topografica | $S_T$ |
|-----------------------|-------|
| T1                    | 1.0   |
| T2                    | 1.2   |

#### 7.4.3 Caratterizzazione sismica dell'area di frana

L'area della frana tra le p.k. 0+925 e 1+300 è caratterizzata dalla **categoria di sottosuolo B**.

In questo caso si è in presenza di una categoria topografica T1 ( $S_T=1$ ), per cui il valore di  $a_{max}$  risulta il seguente:

| Stato Limite | $T_R$ [anni] | $a_{max}$ [g] |
|--------------|--------------|---------------|
| SLO          | 60           | 0.094         |
| SLD          | 101          | 0.117         |
| SLV          | 949          | 0.266         |
| SLC          | 1950         | 0.316         |

#### 7.4.4 Analisi pseudostatiche

Nei metodi pseudo-statici l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso del volume di terreno  $W$  considerato. Tale forza dipende dalle caratteristiche del moto sismico atteso nel volume di terreno e dalla capacità di tale volume di subire spostamenti senza significative riduzioni di resistenza.

Nelle verifiche allo stato limite ultimo, in mancanza di studi specifici, le componenti orizzontale e verticale di tale forza possono esprimersi mediante dei coefficienti di proporzionalità diretta denominati coefficienti sismici orizzontale e verticale e indicati con  $k_h$  e  $k_v$  rispettivamente. I valori dei coefficienti sismici orizzontale  $k_h$  e verticale  $k_v$  possono essere valutati mediante le espressioni (§ 7.11.6.2.1 del D.M. 17.01.2018):

$$\begin{aligned} F_h &= k_h \cdot W \\ F_v &= k_v \cdot W \end{aligned} \quad \text{con} \quad \begin{aligned} k_h &= \beta \cdot a_{max} / g \\ k_v &= \pm 0.5 \cdot k_h \end{aligned}$$

dove:

- $a_{max}$  = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;
- $g$  = accelerazione di gravità;
- $\beta$  = coefficiente di riduzione di  $a_{max}$ .

In assenza di analisi specifiche di risposta sismica locale, l'accelerazione massima può essere valutata mediante la relazione:

$$a_{max} = S \cdot a_g = S_S \cdot S_T \cdot a_g$$

|  |   |  |   |  |                    |
|--|---|--|---|--|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |  |   | REV.<br>A  | FOGLIO<br>46 di 72 |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVIA s.r.l.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA |  sinèrgo |  VA<br>D Vision Architecture |                    |
|  |   |  |   |  | Data<br>02/2024    |

dove:

- $S_s$  = coefficiente di amplificazione stratigrafica (Tab. 3.2.IV);  
 $S_T$  = coefficiente di amplificazione topografica (Tab. 3.2.V);  
 $a_g$  = accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

#### 7.4.5 Stabilità di fronti di scavo e rilevati

Il comportamento in condizioni sismiche dei fronti di scavo e dei rilevati può essere analizzato con gli stessi metodi impiegati per i pendii naturali. Nei metodi pseudostatici i valori dei coefficienti sismici  $k_h$  e  $k_v$  da utilizzare nelle verifiche geotecniche, in mancanza di studi specifici, sono stati ottenuti a partire da una accelerazione orizzontale massima su suolo rigido calcolata in funzione di uno stato limite tipo **SLV – Stato Limite di salvaguardia della Vita** e il valore del coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito  $\beta_s$  da utilizzare risulta (cfr. § 7.11.4.):

$$\beta_s = 0.38 \text{ nelle verifiche dello stato limite ultimo (SLV)}$$

#### 7.4.6 Opere di sostegno

La sicurezza delle opere di sostegno deve essere garantita prima, durante e dopo il terremoto. È ammesso l'uso di metodi pseudo-statici come specificato nel § 7.11.6.2.1.

I valori dei coefficienti sismici  $k_h$  e  $k_v$  da utilizzare nelle verifiche strutturali e geotecniche si ottengono a partire da una accelerazione orizzontale massima su suolo rigido calcolata in funzione di uno stato limite tipo **SLV – Stato Limite di salvaguardia della Vita** come visto nei precedenti paragrafi della relazione e il valore del coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito  $\beta_m$  da utilizzare risulta:

$$\beta_m = 0.38 \text{ nelle verifiche dello stato limite ultimo (SLV)}$$

Per i muri che non siano in grado di subire spostamenti relativi rispetto al terreno, il coefficiente  $\beta_m$  assume valore unitario.

#### 7.4.7 Manufatti scatolari

Il calcolo delle spinte delle terre sui ritti dei manufatti scatolari è stato eseguito assimilando tali opere ad opere di sostegno rigide, che non sono in grado di subire spostamenti relativi rispetto al terreno, il valore del coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito  $\beta_m$  può essere considerato pari a 1.

#### 7.4.8 Paratie

Nel caso delle paratie l'azione sismica, nelle analisi pseudo-statiche, è definita mediante un'accelerazione orizzontale equivalente  $a_h$  pari a:

$$a_h = k_h g = \alpha \cdot \beta \cdot a_{max}$$

dove:

- $g$  = accelerazione di gravità  
 $k_h$  = coefficiente sismico in direzione orizzontale  
 $\alpha$  = coefficiente che tiene conto della deformabilità dei terreni interagenti con l'opera  
 $\beta$  = coefficiente funzione della capacità dell'opera di subire spostamenti senza cadute di resistenza

mentre la componente verticale  $a_v$  dell'accelerazione equivalente può essere posta uguale a 0.

|   |   |  |   |   |                                   |                  |                    |
|---|---|--|---|---|-----------------------------------|------------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T 00-GE 01-GEO-RE 10</b> | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. |  | MANDANTI<br><b>ETIEM</b><br>ENERGIA TERRITORIO AMBIENTE | <b>sinèrgo</b><br><small>INGEGNERIA</small> | <b>VA</b><br>D_VisionArchitecture | REV.<br><b>A</b> | FOGLIO<br>47 di 72 |
|   | Data<br><b>02/2024</b>  |  |   |   |                                   |                  |                    |

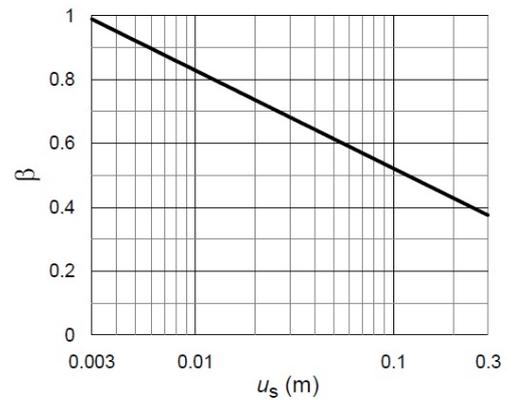
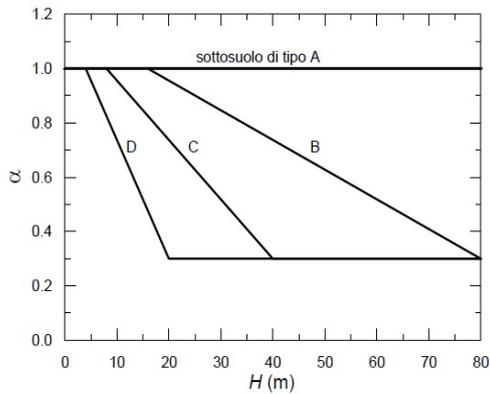
Anche in questo caso l'accelerazione massima può essere valutata mediante un'analisi di risposta sismica locale oppure mediante la relazione:

$$a_{\max} = S \cdot a_g = S_S \cdot S_T \cdot a_g$$

dove:

- $S_S$  = coefficiente di amplificazione stratigrafica (Tab. 3.2.IV);
- $S_T$  = coefficiente di amplificazione topografica (Tab. 3.2.V);
- $a_g$  = accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

I valori dei coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  possono essere ricavati dai grafici sottostanti (cfr. *Figura 7.11.2I* e *Figura 7.11.3* delle NTC 2018):



|  |   |   |                 |          |
|--|---|---|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |   | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVA s.r.l.<br>ENERGIA VALLEA AMBIENTE | A               | 48 di 72 |
|  |   |   | Data<br>02/2024 |          |

## 8 STUDIO GEOTECNICO DELL'AREA DI FRANA TRA LE P.K. 0+925 E 1+300

Lo studio geotecnico dell'area di frana tra le p.k. 0+925 e 1+300 si è basato principalmente sui seguenti elementi:

- classificazione geomorfologica della frana
- analisi interferometrica di immagini radar satellitari
- indagini geognostiche eseguite nell'area di frana
- back-analysis del fenomeno franoso

### 8.1 Classificazione geomorfologica della frana

Tale frana, ubicata in destra idrografica del fiume Sieve:

- dal *Catalogo IFFI – Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia* viene classificata come *scivolamento rotazionale/traslativo*, con *stato di attività n.d. (non determinato)* (cfr. **Figura 1-1**);
- dalla *Banca Dati geomorfologica della Regione Toscana (sito web GEOscopio della Regione Toscana)*, viene classificata come *frana di scorrimento (velocità indeterminata)*, con *stato di attività indeterminata* (cfr. **Figura 1-2**);
- dal *PAI dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale – Bacino del Fiume Arno*, viene classificata come *frana a pericolosità molto elevata PF4 (Figura 1-3)*;
- dal *PAI dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale – Progetto di Piano - PAI "Dissesti geomorfologici"*, il dissesto viene classificato come *area a pericolosità molto elevata P4, scivolamento/colata lenta, attiva (S3)*, che continua a monte come *scivolamento/colata lenta, inattiva potenzialmente instabile (S2)* (cfr. **Figura 1-6**).

### 8.2 Analisi interferometrica di immagini radar satellitari

In questa zona è segnalata dal PAI una *frana di scivolamento e colata lenta attiva (S3) e pericolosità geomorfologica molto elevata (P4)*, interferente direttamente con il tracciato tra le p.k. 0+925 e 1+300 circa, dove non sono previste opere d'arte particolari ma solo una sezione di rilevato/trincea (cfr. **Figura 6-6**). Nell'area il substrato della frana è riferibile alle *Argille e Calcari di Canétolo (ACC)*.

Per quest'area sono disponibili i dati di velocità media annua di alcuni PS registrate dal satellite ERS nel periodo 1992-2000, dal satellite ENVISAT nel periodo 2003-2010 e dal satellite SENTINEL-1 a partire dal 2014 (cfr. **Figura 6-7 e Figura 6-8**).

In corrispondenza del piede della frana, dove sono presenti alcuni edifici, sono presenti sia alcuni PS che indicano una sostanziale stabilità (velocità comprese tra  $-1.9 \div 2$  mm/anno registrate con Envisat ascendente e Sentinel sia ascendente che discendente), sia un unico PS che indica una velocità compresa tra  $-4.9$  e  $-2$  mm/anno (Envisat ascendente). Considerando che il versante in esame è esposto ad Est e che quindi la traiettoria in grado di meglio descrivere l'eventuale movimento è quella ascendente, il dato di velocità relativo satellite Envisat ascendente deve essere considerato con particolare attenzione.

### 8.3 Indagini geognostiche eseguite nell'area di frana

Nell'area di frana tra le p.k. 0+925 e 1+300 circa nella campagna di indagini geognostiche del 2021-2022 è stata prevista l'esecuzione di n. 3 sondaggi a carotaggio continuo da 30 m, tutti strumentati con tubo inclinometrico (SN06-

|  |   |   |                 |          |
|--|---|---|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |   | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVA s.r.l.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA<br> sinèrgo<br> VA<br>D'VisionArchitecture | A               | 49 di 72 |
|  |   |   | Data<br>02/2024 |          |

IN, SN06bis-IN e SN07-IN). Nel corso della perforazione dei sondaggi sono state previste prove SPT e prove di permeabilità Lefranc ed è stato previsto il prelievo di campioni indisturbati e rimaneggiati per l'esecuzione di prove geotecniche di laboratorio

I risultati delle indagini in sito eseguite nel 2021-2022 sono riportati nell'elaborato di progetto **T00GE01GEORE02** - "Documentazione indagini geognostiche – Indagini in sito", mentre i risultati delle prove geotecniche di laboratorio sono riportati nell'elaborato di progetto **T00GE01GEORE04** - "Documentazione indagini geognostiche – Certificati prove geotecniche di laboratorio"

Nel corso del 2023 nell'area di frana sono state previste indagini integrative costituite da:

- n.6 stendimenti sismici a rifrazione in onde P e in onde SH;
- n.6 stendimenti di geoelettrica in modalità ERT;
- n.3 prove con dilatometro piatto Marchetti (DMT1, DMT3, DMT4);
- misure inclinometriche manuali a cadenza mensile per un anno su n.3 inclinometri (SN06-IN, SN06bis-IN, SN07-IN); la lettura di zero è stata eseguita nel giugno 2023, ad oggi sono disponibili le misure di luglio e agosto 2023;
- misure piezometriche manuali a cadenza mensile per un anno su n. 3 piezometri (SN06-PZ, SN06bis-PZ, SN07-PZ).

I risultati delle indagini integrative eseguite nell'area di frana sono riportati nell'elaborato di progetto **T00GE01GEORE07** - "Documentazione indagini geognostiche integrative 2023" e nell'elaborato **T00GE01GEORE08** - "Documentazione indagini geognostiche integrative 2023 - Monitoraggio inclinometrico e piezometrico".

### 8.3.1 Sondaggi geognostici a carotaggio continuo

Le stratigrafie dei sondaggi SN06-IN, SN06bis-IN e SN07-IN eseguiti in quest'area mostrano un livello superficiale di 4÷6 m di spessore costituito da terreni da limoso-sabbiosi ad argilloso-limosi, con clasti e ciottoli calcareo-marnosi, livello seguito da trovanti calcareo-marnosi per circa 2÷4 m, al di sotto dei quali sono presenti ancora terreni limoso-sabbiosi e argilloso limosi con clasti calcareo-marnosi fino a 9÷15 m circa. Seguono siltiti e argilliti varicolori, fratturate, da alterate a debolmente alterate, con inclusi calcareo-marnosi, riconducibili alle porzioni alterata e non alterata della formazione delle Argille e Calcari del Canetolo (ACC), mentre le porzioni superficiali fino a 10÷15 m possono essere riconducibili ai depositi di frana attiva e quiescente.

I valori di  $N_{SPT}$  registrati fino a 9 m di profondità risultano variabili tra 9÷11 e 22÷28, mentre oltre 9 m risultano sempre a rifiuto.

Sono state eseguite anche n. 2 prove di permeabilità tipo Lefranc a 4.20÷4.70 e 5.50÷6.00 m di profondità che hanno fornito un valore di permeabilità variabile tra 3.6E-07 e 4.6E-06 m/s.

### 8.3.2 Prove geotecniche di laboratorio

Le analisi granulometriche eseguite sui campioni rimaneggiati e indisturbati prelevati a profondità da 1 a 7 m circa hanno permesso di classificare i terreni prevalentemente come *limi con argilla sabbiosi deb. ghiaiosi* e *limi argillosi sabbiosi ghiaiosi* secondo la Classificazione AGI, CH, MH, ML (GC) secondo la Classificazione USCS e A7-5, A7-6 secondo la Classificazione CNR-UNI 10006. Il valore dell'indice di plasticità dei terreni  $I_p$  è risultato variabile tra 18 e 30, mentre il peso di volume naturale è risultato variabile tra 19 e 20 kN/m<sup>3</sup>.

|  |   |   |   |   |        |
|--|---|---|---|---|--------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |   |   | REV.  | FOGLIO |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio S.r.l. | MANDANTI<br> EITVA S.p.A.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA |  sinèrgo |  VA<br>D'VisionArchitecture | A      |
|  |   |   |   | Data<br>02/2024   |        |

Sui n. 3 campioni indisturbati sono state eseguite prove di taglio diretto consolidate lente, con determinazione dei valori di picco e residui, che hanno fornito i seguenti valori di resistenza a taglio:

| Campione   | Profondità [m] | Resistenza a taglio di picco |                         | Resistenza a taglio residua |                         |
|------------|----------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
|            |                | $c'_p = 7 \text{ kPa}$       | $\varphi'_p = 26^\circ$ | $c'_r = 0 \text{ kPa}$      | $\varphi'_r = 25^\circ$ |
| SN06-IN I1 | 4.50-4.90      | $c'_p = 7 \text{ kPa}$       | $\varphi'_p = 26^\circ$ | $c'_r = 0 \text{ kPa}$      | $\varphi'_r = 25^\circ$ |
| SN07-IN I1 | 3.00-3.50      | $c'_p = 7 \text{ kPa}$       | $\varphi'_p = 34^\circ$ | $c'_r = 0 \text{ kPa}$      | $\varphi'_r = 28^\circ$ |
| SN07-IN I2 | 6.50-7.00      | $c'_p = 17 \text{ kPa}$      | $\varphi'_p = 13^\circ$ | $c'_r = 0 \text{ kPa}$      | $\varphi'_r = 20^\circ$ |

Si deve tuttavia segnalare l'anomalia dei valori di resistenza registrati durante la prova eseguita sul campione SN07-IN I2, nella quale il valore di angolo di attrito di picco è risultato inferiore al valore residuo, a fronte di un valore di coesione di picco più elevata rispetto alle prove eseguite sugli altri due campioni.

Infine, sul campione SN07-IN I2 (6.50-7.00 m) è stata eseguita anche una prova triassiale UU, che ha fornito un valore di  $c_u = 123 \text{ kPa}$ .

### 8.3.3 Sismica a rifrazione in onde P e SH

Di seguito si riporta una sintesi dei risultati in termini di  $V_P$  e  $V_S$  per ciascuno stendimento eseguito nell'area di frana, riportando le immagini relative alla loro interpretazione con metodo plus minus, dove vengono indicate due principali superfici di rifrazione, identificate nel caso delle onde P con le interfacce corrispondenti la più superficiale alle  $V_P=1200\div 1500 \text{ m/s}$  e la più profonda alle  $V_P=1900\div 2200 \text{ m/s}$  e nel caso delle onde SH con le interfacce corrispondenti la più superficiale alle  $V_S=300\div 400 \text{ m/s}$  e la più profonda alle  $V_{SH}=500\div 600 \text{ m/s}$ . Per ulteriori dettagli si rimanda all'elaborato **T00GE01GEORE07** - "Documentazione indagini geognostiche integrative 2023".

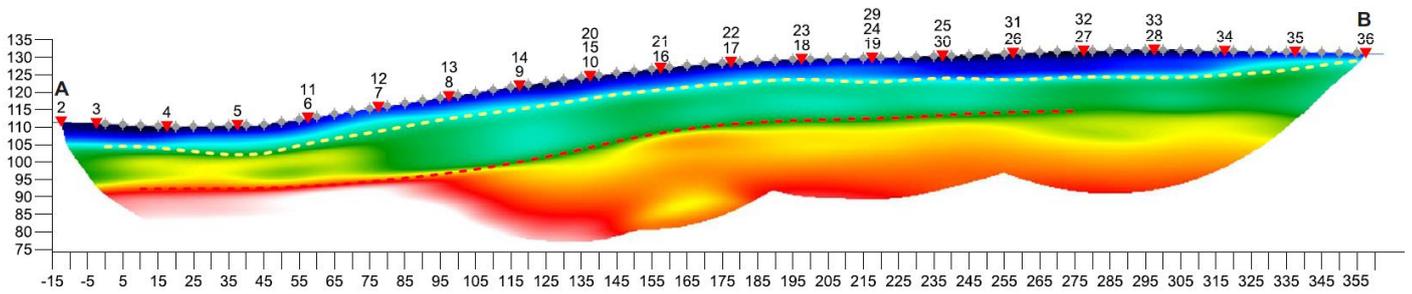
#### Linea B14

Attraverso la misura delle velocità tramite la pendenza delle dromocrone e l'applicazione del metodo del Plus-Minus è possibile individuare la presenza di tre sismostrati principali e quindi di due interfacce sismostratigrafiche (cfr.

#### **Figura 8-1):**

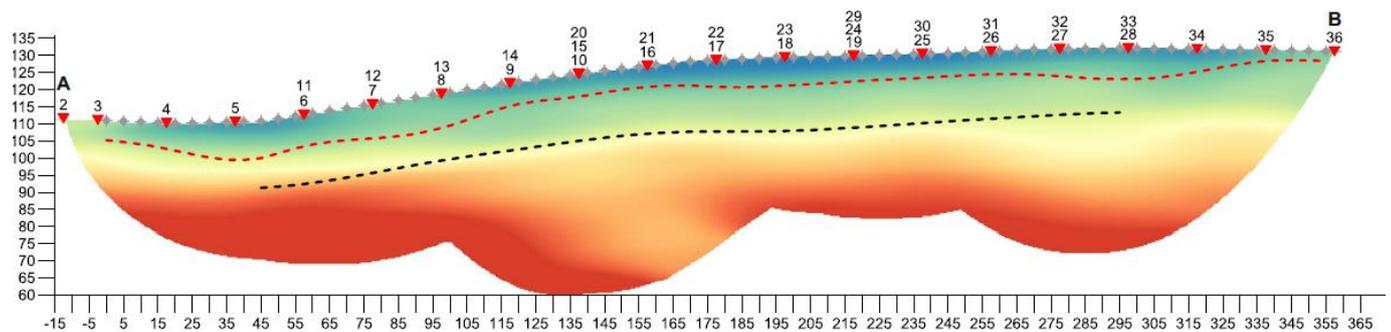
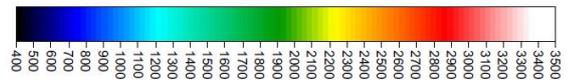
- *sismostrato 1:* materiale limoso/argilloso con alternanze di sabbie e ghiaie  
 $V_P < 1300 \text{ m/s}$ , interfaccia a profondità variabile tra -5 e -8 m dal p.c.  
 $V_S < 400 \text{ m/s}$ , interfaccia a profondità variabile tra -7 e -11 m dal p.c.
- *sismostrato 2:* materiale limoso/argilloso con alternanze di sabbie e ghiaie, verosimilmente saturo, con graduale aumento della compattazione  
 $1300 \text{ m/s} \leq V_P < 1900 \text{ m/s}$ , interfaccia a profondità variabile tra -16 e -19 m dal p.c.  
 $400 \text{ m/s} \leq V_S < 550 \text{ m/s}$ , interfaccia a profondità variabile tra -19 e -20 m dal p.c.
- *sismostrato 3:* materiale a comportamento lapideo o pseudo-lapideo, con un incremento delle proprietà meccaniche con la profondità.  
 $V_P \geq 1900 \text{ m/s}$   
 $V_S \geq 550 \text{ m/s}$

|   |   |   |   |                                   |                        |          |
|---|---|---|---|-----------------------------------|------------------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T 00-GE 01-GEO-RE 10</b> | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ENEA</b><br>ENERGIAMARITIMA s.p.a. | <b>sinèrgo</b><br><small>INGEGNERIA</small> | <b>VA</b><br>D_VisionArchitecture | REV.                   | FOGLIO   |
|   |   |   |   |                                   | A                      | 51 di 72 |
|   |   |   |   |                                   | Data<br><b>02/2024</b> |          |



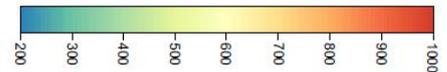
#### LEGENDA

- ▼ PUNTO DI ENERGIZZAZIONE
- ◆ GEOFONO
- - - - Interfaccia 1 :  $V_p = [1300\text{m/s}]$
- - - - Interfaccia 2 :  $V_p = [1900\text{m/s}]$



#### LEGENDA

- ▼ PUNTO DI ENERGIZZAZIONE
- ◆ GEOFONO
- - - - Interfaccia 1 :  $V_s = [400\text{m/s}]$
- - - - Interfaccia 2 :  $V_s = [550\text{m/s}]$



**Figura 8-1** – Stendimento a rifrazione B14\_P (sopra) e B14\_SH (sotto) - Sezioni sismostratigrafiche - Metodo plus minus

### Linea B15

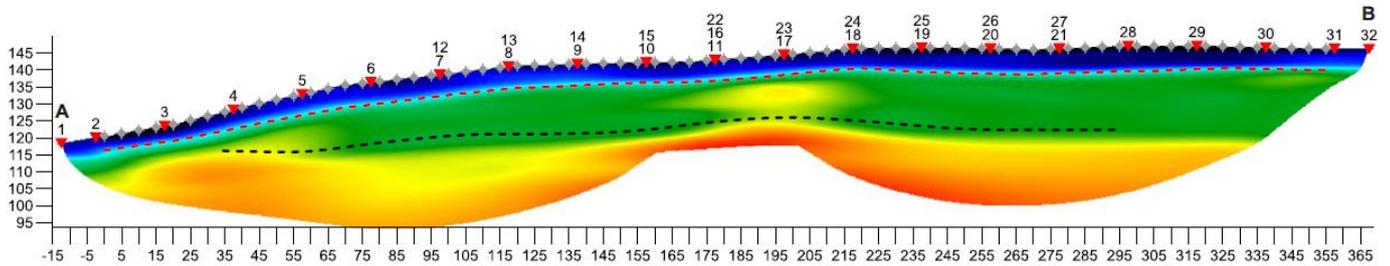
Attraverso la misura delle velocità tramite la pendenza delle dromocrone e l'applicazione del metodo del Plus-Minus è possibile individuare la presenza di tre sismostrati principali e quindi di due interfacce sismostratigrafiche (cfr.

**Figura 8-2):**

- **sismostrato 1:** materiale limoso/argilloso con alternanze di sabbie e ghiaie  
 $V_P < 1400 \text{ m/s}$ , interfaccia a profondità variabile tra -6 e -7 m dal p.c.  
 $V_S < 300 \text{ m/s}$ , interfaccia a profondità variabile tra -6 e -7 m dal p.c.
- **sismostrato 2:** materiale limoso/argilloso con alternanze di sabbie e ghiaie, verosimilmente saturo, con graduale aumento della compattazione  
 $1400 \text{ m/s} \leq V_P < 2000 \text{ m/s}$ , interfaccia a profondità variabile tra -17 e -23 m dal p.c.  
 $300 \text{ m/s} \leq V_S < 550 \text{ m/s}$ , interfaccia a profondità variabile tra -17 e -20 m dal p.c.
- **sismostrato 3:** materiale a comportamento lapideo o pseudo-lapideo, con un incremento delle proprietà meccaniche con la profondità.  
 $V_P \geq 2000 \text{ m/s}$

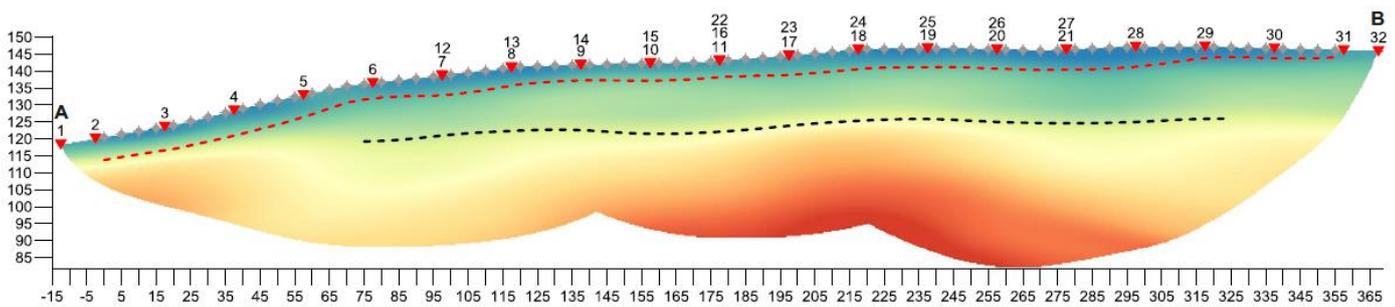
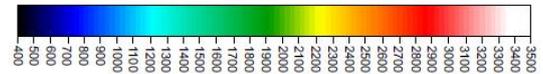
|   |   |  |                  |                    |
|---|---|--|------------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T 00-GE 01-GEO-RE 10</b> | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br> MANDANTI<br>   |  | REV.<br><b>A</b> | FOGLIO<br>52 di 72 |
|   | Data<br><b>02/2024</b>  |  |                  |                    |

$V_s \geq 550$  m/s



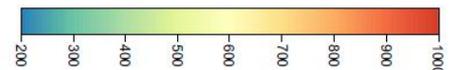
**LEGENDA**

- ▼ PUNTO DI ENERGIZZAZIONE
- ◆ GEOFONO
- - - Interfaccia 1 :  $V_p = [1400\text{m/s}]$
- - - Interfaccia 2 :  $V_p = [2000\text{m/s}]$



**LEGENDA**

- ▼ PUNTO DI ENERGIZZAZIONE
- ◆ GEOFONO
- - - Interfaccia 1 :  $V_s = [300\text{m/s}]$
- - - Interfaccia 2 :  $V_s = [550\text{m/s}]$



**Figura 8-2** – Stendimento a rifrazione B15\_P (sopra) e B15\_SH (sotto) - Sezioni sismostratigrafiche - Metodo plus minus

**Linea B16**

Attraverso la misura delle velocità tramite la pendenza delle dromocrone e l'applicazione del metodo del Plus-Minus è possibile individuare la presenza di tre sismostrati principali e quindi di due interfacce sismostratigrafiche (cfr.

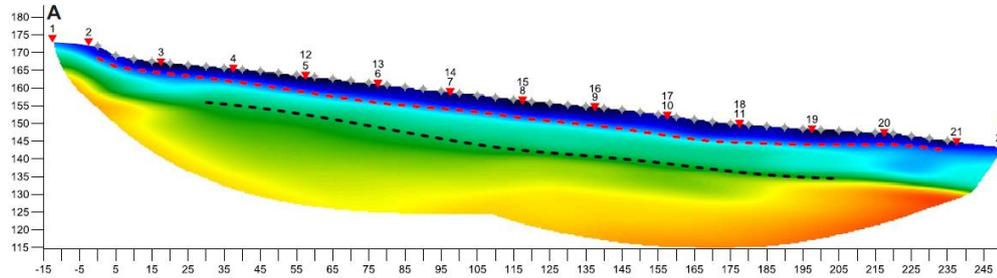
**Figura 8-3**):

- *sismostrato 1*: materiale limoso/argilloso con alternanze di sabbie e ghiaie  
 $V_P < 1300$  m/s, interfaccia a profondità variabile tra -3 e -7 m dal p.c.  
 $V_S < 300$  m/s, interfaccia a profondità variabile tra -2 e -3 m dal p.c.
- *sismostrato 2*: materiale limoso/argilloso con alternanze di sabbie e ghiaie, verosimilmente saturo, con graduale aumento della compattazione  
 $1300 \text{ m/s} \leq V_P < 1900$  m/s, interfaccia a profondità variabile tra -11 e -14 m dal p.c.  
 $300 \text{ m/s} \leq V_S < 500$  m/s, interfaccia a profondità variabile tra -14 e -18 m dal p.c.
- *sismostrato 3*: materiale a comportamento lapideo o pseudo-lapideo, con un incremento delle proprietà meccaniche con la profondità.

|   |   |   |         |          |
|---|---|---|---------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T 00-GE 01-GEO-RE 10</b> | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ENERGIA VALLE D'AOSTA</b><br><b>sinèrgo</b><br><b>D_VA</b><br>D_VisionArchitecture | REV.    | FOGLIO   |
|   |   |   | A       | 53 di 72 |
|   |   |   | Data    |          |
|   |   |   | 02/2024 |          |

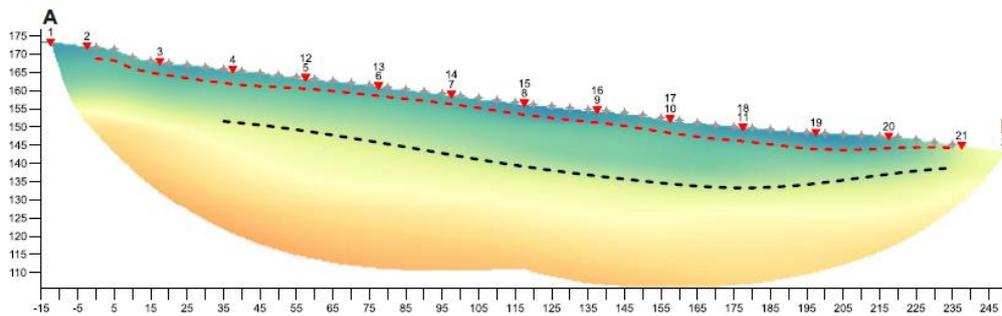
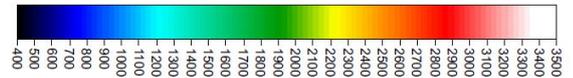
$V_P \geq 1900 \text{ m/s}$

$V_S \geq 500 \text{ m/s}$



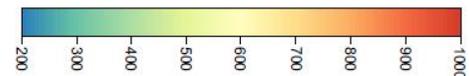
#### LEGENDA

- ▼ PUNTO DI ENERGIZZAZIONE
- ◆ GEOFONO
- - - Interfaccia 1 :  $V_p = [1300\text{m/s}]$
- - - Interfaccia 2 :  $V_p = [1900\text{m/s}]$



#### LEGENDA

- ▼ PUNTO DI ENERGIZZAZIONE
- ◆ GEOFONO
- - - Interfaccia 1 :  $V_s = [300\text{m/s}]$
- - - Interfaccia 2 :  $V_s = [500\text{m/s}]$



**Figura 8-3** – Stendimento a rifrazione B16\_P (sopra) e B16\_SH (sotto) - Sezioni sismostratigrafiche - Metodo plus minus

### Linea B17

Attraverso la misura delle velocità tramite la pendenza delle dromocrone e l'applicazione del metodo del Plus-Minus è possibile individuare la presenza di tre sismostrati principali e quindi di due interfacce sismostratigrafiche (cfr.

#### **Figura 8-4):**

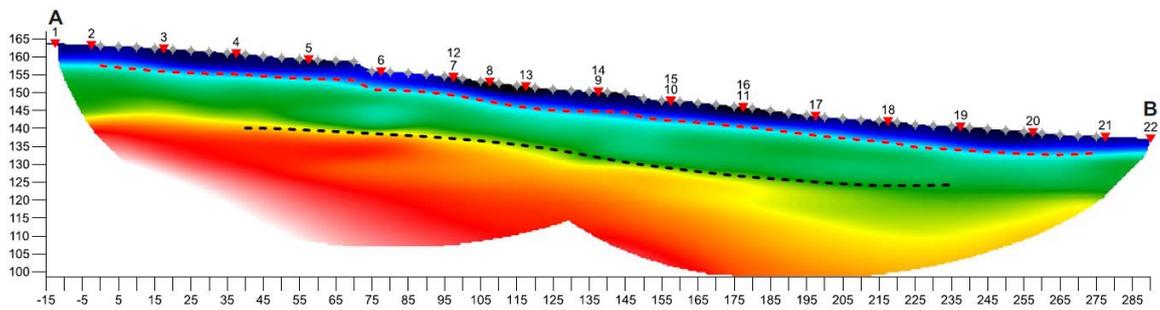
- *sismostrato 1*: materiale limoso/argilloso con alternanze di sabbie e ghiaie  
 $V_P < 1200 \text{ m/s}$ , interfaccia a profondità variabile tra -4 e -6 m dal p.c.  
 $V_S < 300 \text{ m/s}$ , interfaccia a profondità variabile tra -8 e -13 m dal p.c.
- *sismostrato 2*: materiale limoso/argilloso con alternanze di sabbie e ghiaie, verosimilmente saturo, con graduale aumento della compattazione  
 $1200 \text{ m/s} \leq V_P < 2200 \text{ m/s}$ , interfaccia a profondità variabile tra -17 e -19 m dal p.c.  
 $300 \text{ m/s} \leq V_S < 500 \text{ m/s}$ , interfaccia a profondità variabile tra -19 e -20 m dal p.c.

|  |   |   |                |                                   |                 |                    |
|--|---|---|----------------|-----------------------------------|-----------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE<br><br>MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><br><b>ETA</b><br>ENERGIA VALLEA AMBIENTE | <b>sinèrgo</b> | <b>VA</b><br>D.VisionArchitecture | REV.<br>A       | FOGLIO<br>54 di 72 |
|  |   |   |                |                                   | Data<br>02/2024 |                    |

- *sismostrato 3*: materiale a comportamento lapideo o pseudo-lapideo, con un incremento delle proprietà meccaniche con la profondità.

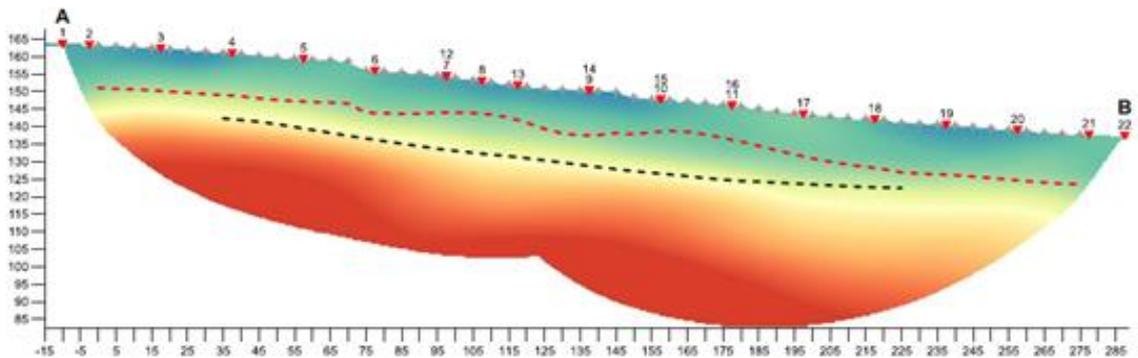
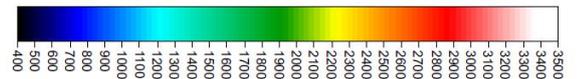
$$V_P \geq 2200 \text{ m/s}$$

$$V_S \geq 500 \text{ m/s}$$



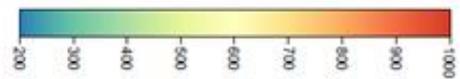
#### LEGENDA

- ▼ PUNTO DI ENERGIZZAZIONE
- ◇ GEOFONO
- - - - Interfaccia 1 :  $V_p = [1200\text{m/s}]$
- - - - Interfaccia 2 :  $V_p = [2200\text{m/s}]$



#### LEGENDA

- ▼ PUNTO DI ENERGIZZAZIONE
- ◇ GEOFONO
- - - - Interfaccia 1 :  $V_p = [300\text{m/s}]$
- - - - Interfaccia 2 :  $V_p = [500\text{m/s}]$



**Figura 8-4** – Stendimento a rifrazione B17\_P (sopra) e B17\_SH (sotto) - Sezioni sismostratigrafiche - Metodo plus minus

### Linea B18

Attraverso la misura delle velocità tramite la pendenza delle dromocrone e l'applicazione del metodo del Plus-Minus è possibile individuare la presenza di tre sismostrati principali e quindi di due interfacce sismostratigrafiche (cfr.

**Figura 8-5**):

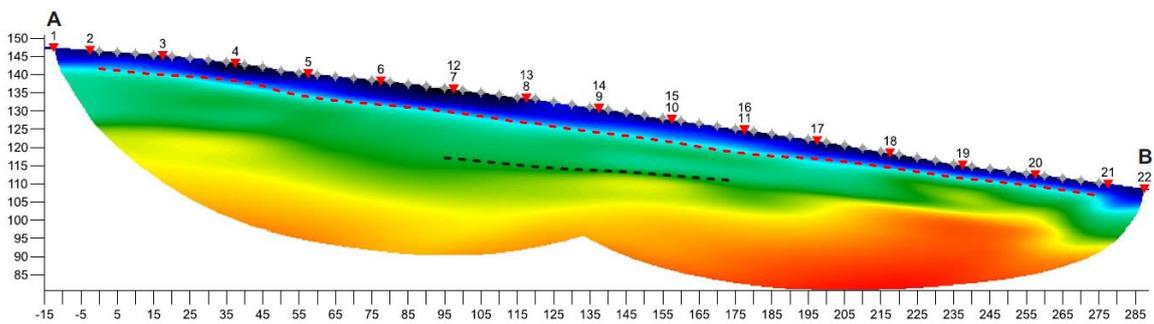
- *sismostrato 1*: materiale limoso/argilloso con alternanze di sabbie e ghiaie

$$V_P < 1500 \text{ m/s, interfaccia a profondità variabile tra -6 e -7 m dal p.c.}$$

$$V_S < 350 \text{ m/s, interfaccia a profondità variabile tra -5 e -7 m dal p.c.}$$

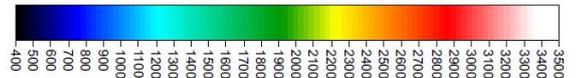
|   |   |  |  |                  |                        |
|---|---|--|--|------------------|------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T 00-GE 01-GEO-RE 10</b> | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. |  | MANDANTI<br>   | REV.<br><b>A</b> | FOGLIO<br>55 di 72     |
|   |   |  |  |                  | Data<br><b>02/2024</b> |

- *sismostrato 2*: materiale limoso/argilloso con alternanze di sabbie e ghiaie, verosimilmente saturo, con graduale aumento della compattazione  
 $1500 \text{ m/s} \leq V_P < 1900 \text{ m/s}$ , interfaccia a profondità variabile tra -15 e -19 m dal p.c.  
 $350 \text{ m/s} \leq V_S < 500 \text{ m/s}$ , interfaccia a profondità variabile tra -16 e -22 m dal p.c.
- *sismostrato 3*: materiale a comportamento lapideo o pseudo-lapideo, con un incremento delle proprietà meccaniche con la profondità.  
 $V_P \geq 1900 \text{ m/s}$   
 $V_S \geq 500 \text{ m/s}$

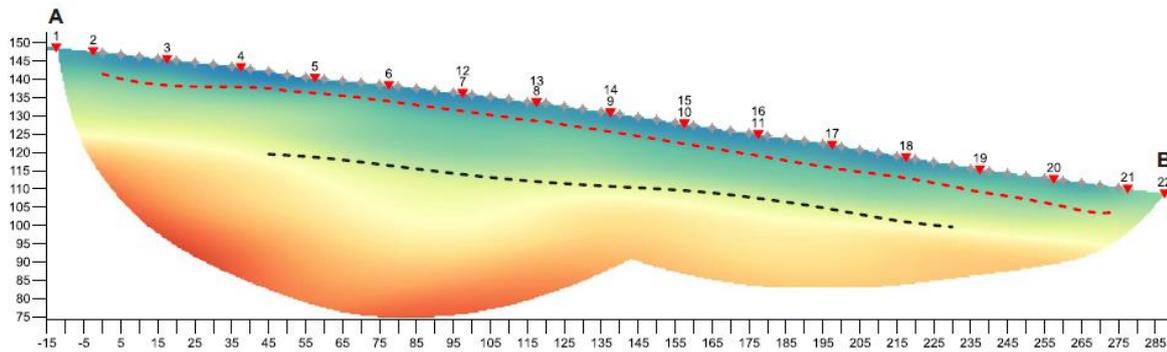


**LEGENDA**

- ▼ PUNTO DI ENERGIZZAZIONE
- ◆ GEOFONO
- - - Interfaccia 1 :  $V_p = [1500\text{m/s}]$
- - - Interfaccia 2 :  $V_p = [1900\text{m/s}]$



B18\_SH, 20 WET iterations, RMS error 1.2 % = 4.45 ms, Version 3.34



**LEGENDA**

- ▼ PUNTO DI ENERGIZZAZIONE
- ◆ GEOFONO
- - - Interfaccia 1 :  $V_p = [350\text{m/s}]$
- - - Interfaccia 2 :  $V_p = [500\text{m/s}]$



**Figura 8-5** – Stendimento a rifrazione B18\_P (sopra) e B18\_SH (sotto) - Sezioni sismostratigrafiche - Metodo plus minus

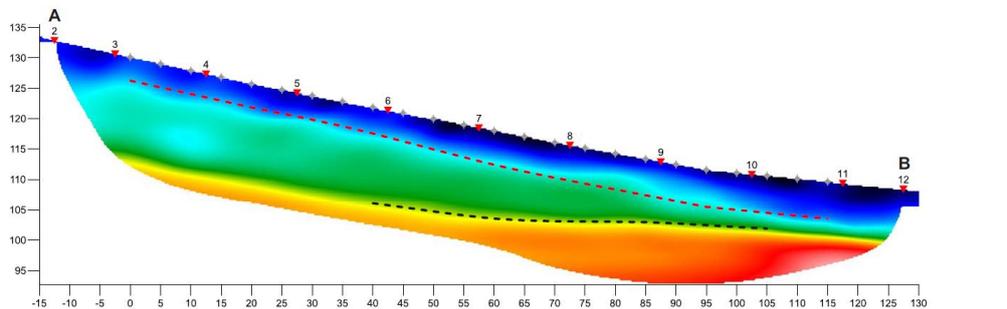
|  |  |  |                 |          |
|--|--|--|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETA</b><br>ENERGIA VALLE D'AOSTA<br><b>sinèrgo</b><br>DVISIONArchitecture | A               | 56 di 72 |
|  |  |  | Data<br>02/2024 |          |

## Linea B19

Attraverso la misura delle velocità tramite la pendenza delle dromocrone e l'applicazione del metodo del Plus-Minus è possibile individuare la presenza di tre sismostrati principali e quindi di due interfacce sismostratigrafiche (cfr.

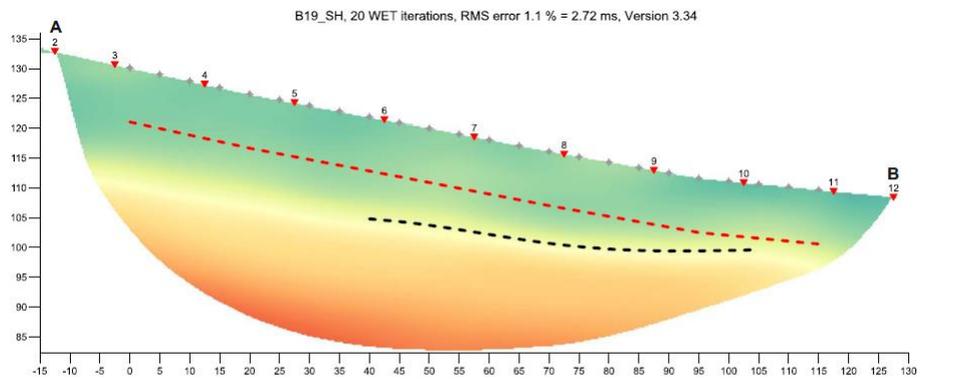
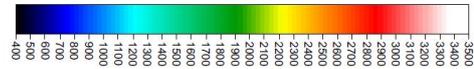
**Figura 8-6** **Figura 8-5**):

- **sismostrato 1:** materiale limoso/argilloso con alternanze di sabbie e ghiaie  
 $V_P < 1300$  m/s, interfaccia a profondità variabile tra -4 e -6 m dal p.c.  
 $V_S < 400$  m/s, interfaccia a profondità variabile tra -9 e -10 m dal p.c.
- **sismostrato 2:** materiale limoso/argilloso con alternanze di sabbie e ghiaie, verosimilmente saturo, con graduale aumento della compattazione  
 $1300$  m/s  $\leq V_P < 2100$  m/s, interfaccia a profondità variabile tra -10 e -15 m dal p.c.  
 $400$  m/s  $\leq V_S < 600$  m/s, interfaccia a profondità variabile tra -12 e -16 m dal p.c.
- **sismostrato 3:** materiale a comportamento lapideo o pseudo-lapideo, con un incremento delle proprietà meccaniche con la profondità.  
 $V_P \geq 2100$  m/s  
 $V_S \geq 600$  m/s



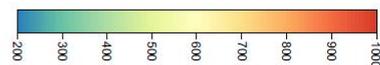
### LEGENDA

- ▼ PUNTO DI ENERGIZZAZIONE
- ◆ GEOFONO
- - - Interfaccia 1 :  $V_p = [1300\text{m/s}]$
- - - Interfaccia 2 :  $V_p = [2100\text{m/s}]$



### LEGENDA

- ▼ PUNTO DI ENERGIZZAZIONE
- ◆ GEOFONO
- - - Interfaccia 1 :  $V_p = [400\text{m/s}]$
- - - Interfaccia 2 :  $V_p = [600\text{m/s}]$



|   |   |  |                  |                    |
|---|---|--|------------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T 00-GE 01-GEO-RE 10</b> | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br> MANDANTI<br>   |  | REV.<br><b>A</b> | FOGLIO<br>57 di 72 |
|   |   |  |                  | Data<br>02/2024    |

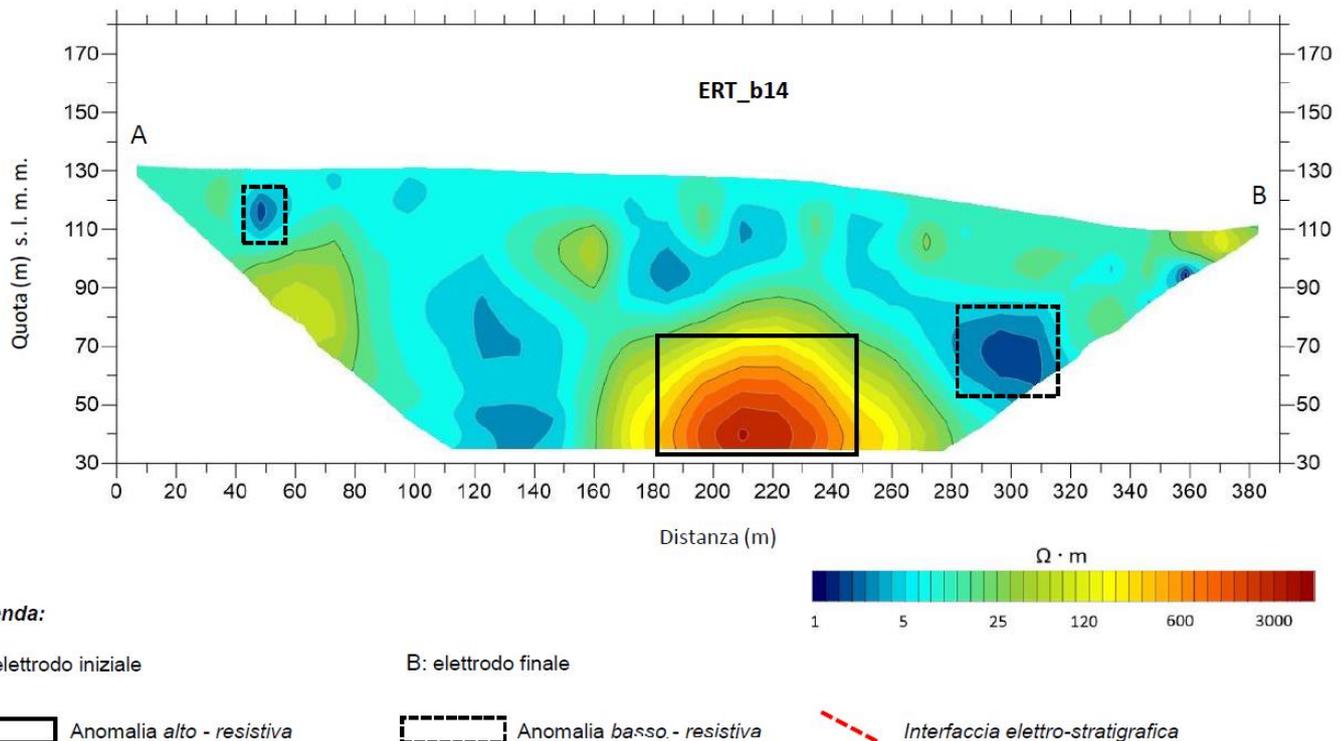
**Figura 8-6** – Stendimento a rifrazione B19\_P (sopra) e B19\_SH (sotto) - Sezioni sismostratigrafiche - Metodo plus minus

### 8.3.4 Geoelettrica

Di seguito si riporta una sintesi dei risultati degli stendimenti di tomografia elettrica ERT eseguiti nell'area di frana, rimandando all'elaborato **T00GE01GEORE07** - "Documentazione indagini geognostiche integrative 2023" per ulteriori dettagli.

#### **ERT - B14**

La massima profondità raggiunta è stata di 90 m. Dalla tomografia si rileva una porzione "alto-resistiva" ( $150 \Omega \cdot m < \rho < 3000 \Omega \cdot m$ ) correlabile a terreni caratterizzati da elevate proprietà geomeccaniche e/o roccia. Invece, i valori "basso-resistivi" ( $1 \Omega \cdot m < \rho < 10 \Omega \cdot m$ ) sono associabili a zone sature di fluidi, caratterizzate da diversi gradi di saturazione e mineralizzazione all'interno di una matrice di varia natura e grado di compattazione. E' stata riconosciuta, nei range di resistività visibili nella restante parte della tomografia ( $5 \Omega \cdot m < \rho < 120 \Omega \cdot m$ ), una corrispondenza con litologie di tipo limoso/argilloso con anche alternanze di sabbie e ghiaie nei livelli più superficiali con un graduale aumento della compattazione e passaggio a orizzonti più litoidi con l'aumentare della profondità (cfr. **Figura 8-7**).



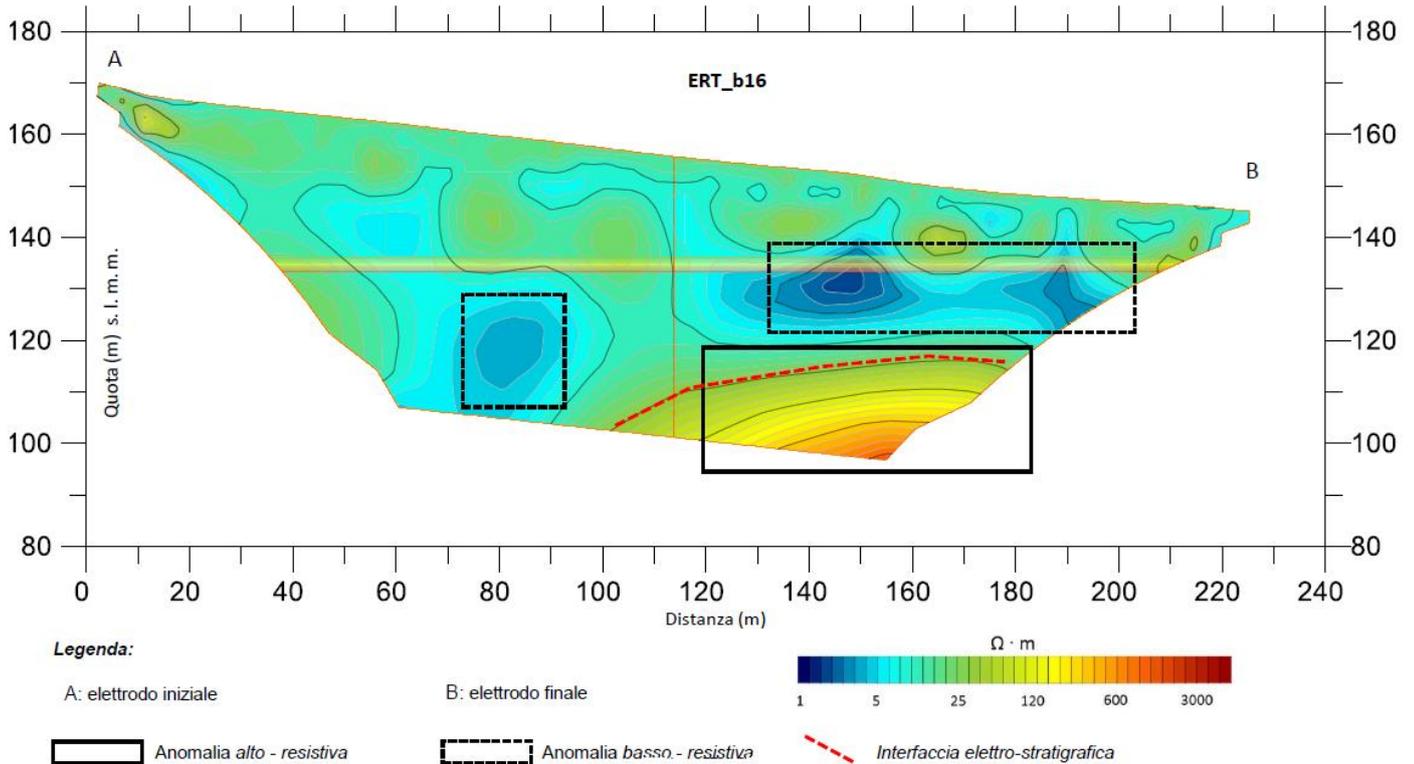
**Figura 8-7** – Linea tomografica elettrica B14

#### **ERT - B15**

La massima profondità raggiunta è stata di 90 m. Dalla tomografia si rileva una porzione "alto-resistiva" inclinata nella porzione finale più profonda della tomografia ( $500 \Omega \cdot m < \rho < 2000 \Omega \cdot m$ ) correlabile a terreni caratterizzati da elevate proprietà geomeccaniche e/o roccia. Invece, i valori "basso-resistivi" ( $1 \Omega \cdot m < \rho < 10 \Omega \cdot m$ ) sono associabili a zone sature di fluidi, caratterizzate da diversi gradi di saturazione e mineralizzazione all'interno di una matrice di varia natura e grado di compattazione. E' stata riconosciuta inoltre, nei range di resistività visibili nella restante parte della tomografia ( $5 \Omega \cdot m < \rho < 120 \Omega \cdot m$ ), una corrispondenza con litologie di tipo limoso/argilloso con anche alternanze di



|   |   |  |  |   |                                  |                  |                        |
|---|---|--|--|---|----------------------------------|------------------|------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T 00-GE 01-GEO-RE 10</b> | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. |  | MANDANTI<br><b>ETIQA</b><br>ENERGIA VALLE D'AGOSTO | <b>sinèrgo</b><br><small>INGEGNERIA</small> | <b>VA</b><br>DVisionArchitecture | REV.<br><b>A</b> | FOGLIO<br>59 di 72     |
|   |   |  |  |   |                                  |                  | Data<br><b>02/2024</b> |



**Figura 8-9 – Linea tomografica elettrica B16**

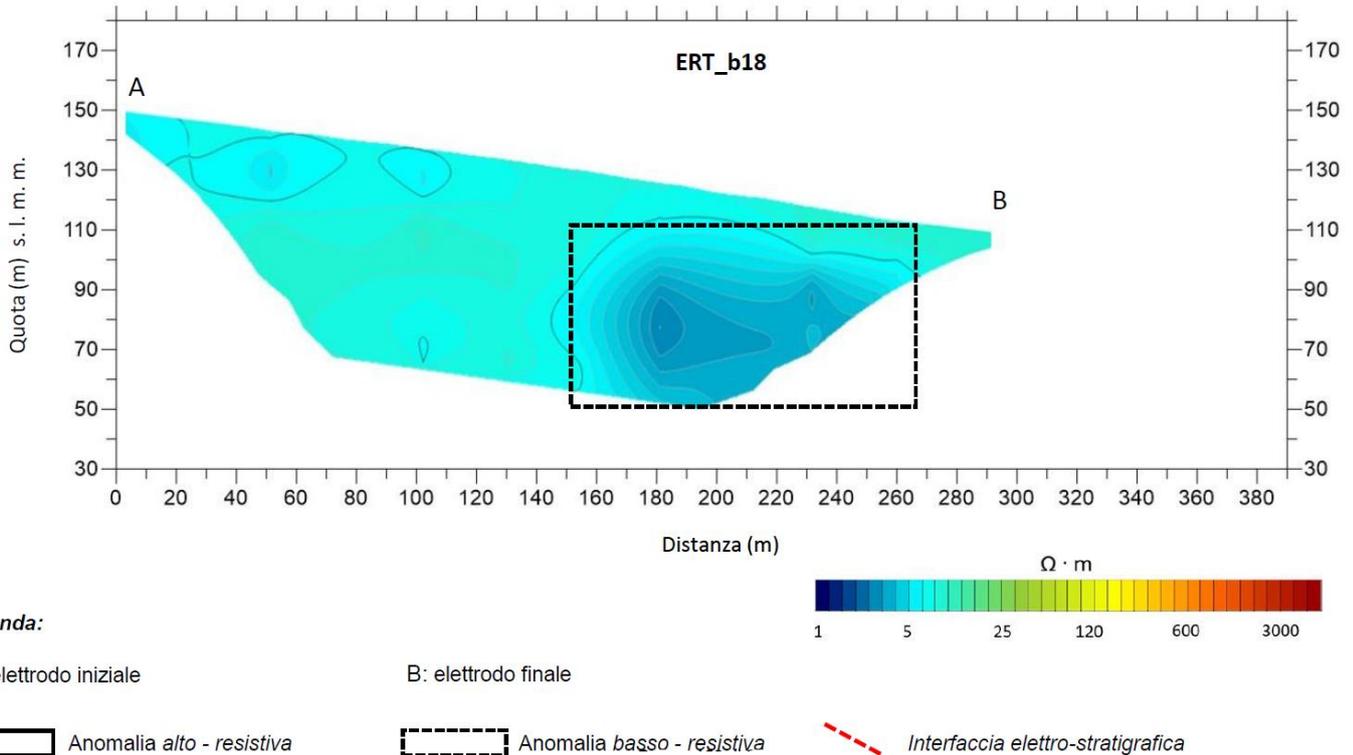
### **ERT - B17**

La massima profondità raggiunta è di 60 m. Dalla tomografia non si rilevano particolari anomalie; va segnalata solo una porzione “basso resistiva” ( $1 \Omega \cdot m < \rho < 10 \Omega \cdot m$ ) associabile ad una lente saturata di fluidi, caratterizzata da diversi gradi di saturazione e mineralizzazione all’interno di una matrice di varia natura e grado di compattazione.

E’ stata riconosciuta, nei range di resistività visibili nella restante parte della tomografia ( $5 \Omega \cdot m < \rho < 120 \Omega \cdot m$ ), una corrispondenza con litologie di tipo limoso/argilloso con anche alternanze di sabbie e ghiaie nei livelli più superficiali con un graduale aumento della compattazione. In questo caso sia dai range di resistività che dalle morfologie non è possibile riconoscere alcun passaggio o transizione a orizzonti più litoidi con l’aumentare della profondità in nessun punto della tomografia. Esclusivamente nella porzione marginale verso il punto di inizio, tra il metro 20 e il metro 60 di progressione orizzontale, è possibile riscontrare la presenza di una anomalia caratterizzata da un range di resistività  $25 \Omega \cdot m < \rho < 120 \Omega \cdot m$  correlabile ad una porzione di materiale più compatto (cfr. **Figura 8-10**).



|   |   |  |  |                  |                        |
|---|---|--|--|------------------|------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T 00-GE 01-GEO-RE 10</b> | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. |  | MANDANTI<br>   | REV.<br><b>A</b> | FOGLIO<br>61 di 72     |
|   |   |  |  |                  | Data<br><b>02/2024</b> |



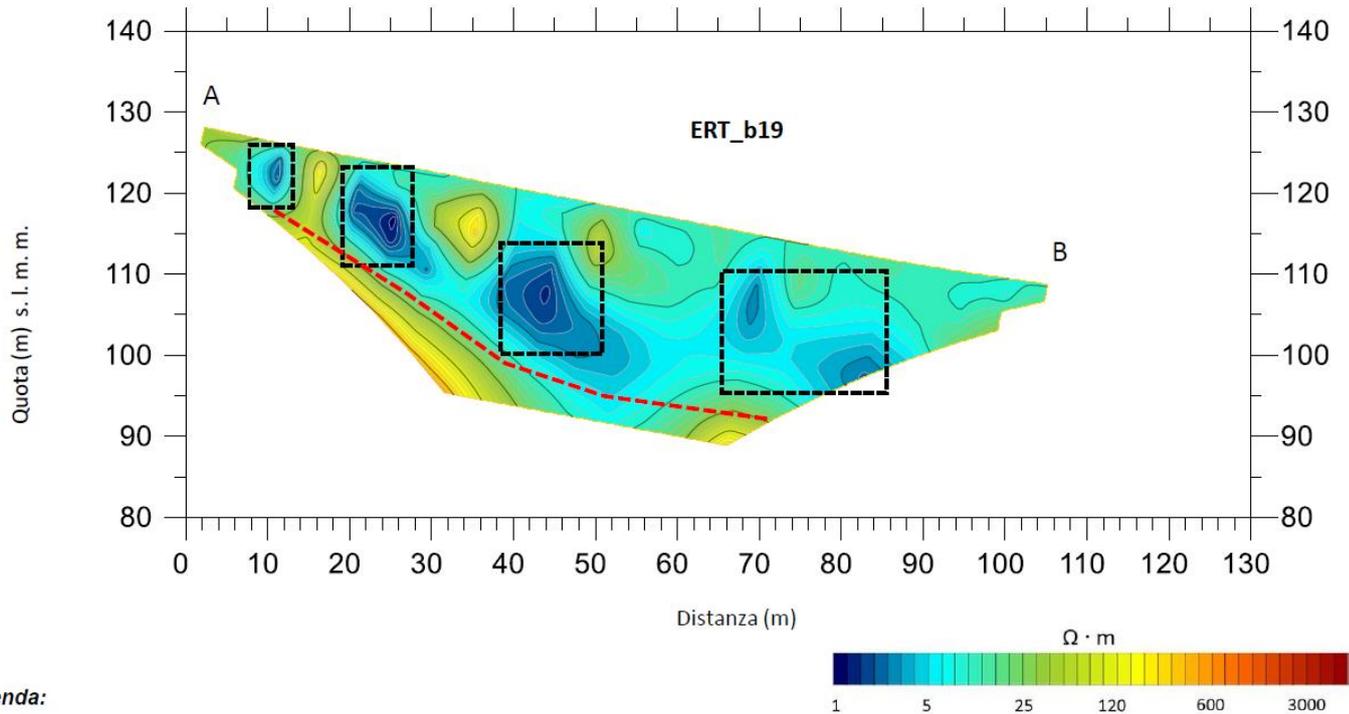
**Figura 8-11 – Linea tomografica elettrica B18**

### **ERT - B19**

La massima profondità raggiunta è di 30 m. Dalla tomografia non si rilevano particolari anomalie; vanno segnalate quattro porzioni “basso-resistive” ( $1 \Omega \cdot m < \rho < 10 \Omega \cdot m$ ) associabili probabilmente a lenti sature di fluidi, caratterizzate da diversi gradi di saturazione e mineralizzazione all’interno di una matrice di varia natura e grado di compattazione.

Alla base di queste anomalie conduttive si attesta un orizzonte abbastanza continuo caratterizzato da valori di resistività medio-alti con resistività  $500 \Omega \cdot m < \rho < 1000 \Omega \cdot m$ , correlabile alla sommità delle argilliti alterate, come confermato dalla stratigrafia del sondaggio SN07-IN che intercetta la linea in oggetto al metro 80 di progressione orizzontale; quest’ultimo consente di tarare i risultati ottenuti con le litologie reali e anche di correlare una possibile superficie di scorrimento. Dall’analisi della stratigrafia del sondaggio SN07-IN si rilevano, fino al metro 11 dal piano campagna, delle alternanze di limi e argille con inclusi litici, trovanti e grossi clasti sempre più compatti (coerente con i range di resistività riscontrati); dal metro 11 fino a fondo foro si rilevano le argilliti da mediamente compatte a compatte con livelli fratturati e presenza di marna mediamente compatta a fondo foro (anche in questo caso i valori di resistività misurati sono coerenti, tuttavia si tratta di una porzione marginale). Tale contatto basale, essendo ad una profondità variabile da 20 a 35 m, potrebbe essere riconducibile alla porzione sommitale del grosso banco di argilliti (cfr. **Figura 8-12**).

|   |   |  |  |                  |                        |
|---|---|--|--|------------------|------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T 00-GE 01-GEO-RE 10</b> | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. |  | MANDANTI<br>   | REV.<br><b>A</b> | FOGLIO<br>62 di 72     |
|   |   |  |  |                  | Data<br><b>02/2024</b> |



**Legenda:**

A: elettrodo iniziale

B: elettrodo finale

 Anomalia alto-resistiva

 Anomalia basso-resistiva

 Interfaccia elettro-stratigrafica

**Figura 8-12 – Linea tomografica elettrica B19**

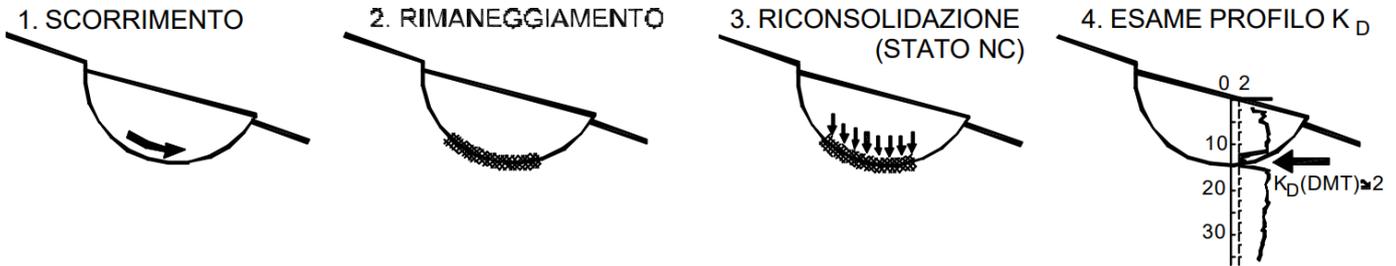
### 8.3.5 Prove con dilatometro piatto Marchetti

Per la caratterizzazione dell'area di frana sono state previste anche prove con dilatometro piatto Marchetti. La prova DMT, infatti, permette di verificare se un pendio in argille sovraconsolidate (OC) contiene superfici di scivolamento attive o quiescenti. Il metodo (Totani et al., 1997), che si basa sull'ispezione dei profili di  $K_D$  (cfr. **Figura 8-13**) si basa sulle seguenti considerazioni:

- la sequenza scorrimento-rimaneggiamento-riconsolidazione connessa con il verificarsi di una frana in un pendio costituito da argille OC in genere porta alla formazione di una zona rimaneggiata, ovvero di argilla pressoché normalconsolidata (NC) con perdita di struttura, aging o cementazione, nella fascia di terreno a cavallo della superficie di scorrimento;
- poiché in argille NC (prive di struttura, aging o cementazione)  $K_D = 2$ , se un pendio di argille OC contiene strati con  $K_D = 2$  questi appartengono, con buona probabilità, ad una superficie di scorrimento attiva o quiescente. In pratica il metodo consiste nell'identificare strati di argilla NC in un pendio che per il resto è caratterizzato da un profilo OC (ad es.  $K_D = 6 \div 8$ ), usando  $K_D = 2$  come identificatore delle zone NC.

Dato che con questo metodo l'individuazione delle superfici di scorrimento è molto più veloce di quella ottenibile con gli inclinometri, per i quali occorre attendere il verificarsi di effettivi scivolamenti, sono state previste n. 3 prove con dilatometro piatto Marchetti DMT da associare alle n. 3 verticali inclinometriche (SN06-IN, SN06bis-IN, SN07-IN). Il metodo, infatti, è particolarmente adatto ad essere utilizzato in combinazione con gli inclinometri essendo in grado di rivelare anche eventuali superfici quiescenti, non rilevabili con gli inclinometri e che potrebbero riattivarsi ad es. in occasione di scavi, ma non consente di stabilire se la frana è in atto e l'entità degli spostamenti.

|  |  |  |                                     |                    |
|--|--|--|-------------------------------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  | REV.<br>A                           | FOGLIO<br>63 di 72 |
|  | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ENERGIA VALLE D'AOSTA</b> | Data<br>02/2024                     |                    |
|  |  | <b>sinèrgo</b>                           | <b>D_VA</b><br>D_VisionArchitecture |                    |

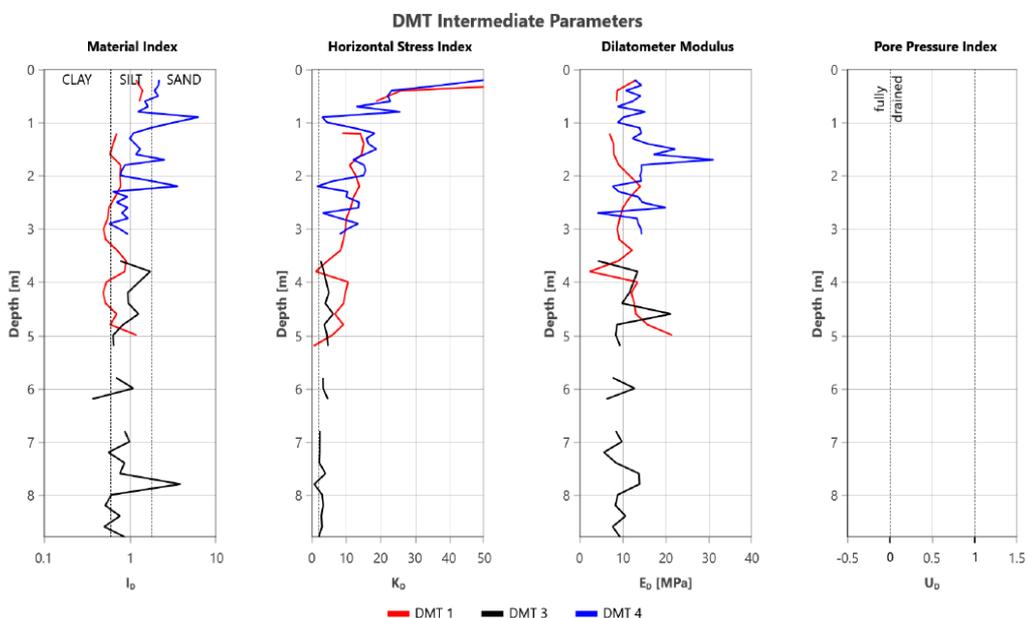


**Figura 8-13** – Metodo KD per l'individuazione di superfici di scorrimento in argille OC (da G. Totani, S. Marchetti, P. Monaco, M. Calabrese, 1997)

Sono state eseguite n.3 prove con dilatometro piatto Marchetti (DMT1, DMT3, DMT4) utilizzando un penetrometro cingolato Pagani statico-dinamico TG63-200, con aste a doppio principio (2P). Tuttavia, in ciascuna ubicazione di prova, prevista inizialmente in adiacenza ad ogni verticale inclinometrica, è stato necessario eseguire l'ancoraggio più volte, poiché la presenza di alcuni corpi rocciosi ne impediva l'esecuzione. Date le difficoltà di ancoraggio, alcune ubicazioni di prova sono state modificate rispetto alla loro posizione originale. La prova DMT2 ha richiesto ben cinque tentativi di ancoraggio, dopo i quali è stato deciso di rinunciare alla sua esecuzione. Nell'ubicazione DMT 3 è stato eseguito un preforo sino alla profondità di circa 3.60 m, a partire dalla quale sono iniziate le misure. Tutte le prove sono terminate alla profondità di rifiuto del penetrometro, ovvero quando la spinta era massima e il penetrometro, seppur ancorato, iniziava a sollevarsi.

Nell'elaborato **T00GE01GEORE07** - "Documentazione indagini geognostiche integrative 2023" sono riportati sia i report ufficiali sia l'interpretazione di tali prove.

Per le difficoltà di ancoraggio e di penetrazione delle prove, dovute alla presenza di blocchi rocciosi inglobati nel terreno, le prove si sono arrestate a modesta profondità (DMT1 a 5.20 m, DMT3 a 9.00 m, DMT4 a 3.20 m; la prova DMT3 inoltre ha dovuto prevedere un preforo fino a 3.60 m).



**Figura 8-14** – Prove DMT – Parametri intermedi

|  |   |   |                 |          |
|--|---|---|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |   | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVA s.r.l.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA<br> sinèrgo<br> VA<br>D.VisionArchitecture | A               | 64 di 72 |
|  |   |   | Data<br>02/2024 |          |

Dal grafico di **Figura 8-14** è possibile verificare che a partire da 4 ÷ 5 m nelle prove DMT1 e DMT3 il valore di  $K_D$  risulta molto prossimo a  $K_D=2$ , tuttavia la lunghezza estremamente ridotta delle prove e, soprattutto, la mancanza del tratto inferiore sovraconsolidato, non consentono di individuare correttamente la profondità di una eventuale superficie di scivolamento, attiva o quiescente che sia.

### 8.3.6 Monitoraggio inclinometrico

Nel mese di giugno 2023 è stato avviato il monitoraggio inclinometrico dell'area di frana, nella quale erano state precedentemente realizzate, durante la campagna di indagini 2021-2022, n. 3 verticali inclinometriche (SN06-IN, SN06bis-IN e SN07-IN) di lunghezza pari a 30 m.

La “lettura di zero” è stata eseguita il 14/06/2023. I dati acquisiti sono stati elaborati con il software OG 390 Win PRO fornito dalla O.T.R. srl. e i risultati sono mostrati **T00GE01GEORE07** - “Documentazione indagini geognostiche integrative 2023” a cui si rimanda.

Successivamente sono state eseguite due misure, la prima il 24/07/2023 e la seconda il 31/08/2023. Anche in questo caso i dati acquisiti sono stati elaborati con il software OG 390 Win PRO fornito dalla O.T.R. srl. mentre i risultati delle misure sono mostrati nell'elaborato **T00GE01GEORE08** - “Documentazione indagini geognostiche integrative 2023 - Monitoraggio inclinometrico e piezometrico” .

I risultati delle prime misure finora eseguite sui tre inclinometri, con riferimento all'ultima misura del 31/01/2024 (oltre 7 mesi dalla lettura di zero del 14/06/2023) consentono di fare le seguenti osservazioni, con riferimento al grafico del movimento per punti e al grafico del movimento per sommatoria:

- **SN06-IN** (profondità del tubo inclinometrico 20.5 m): il grafico del movimento per punti rispetto all'origine mostra uno spostamento di 0.8 mm a 12 m di profondità (cfr. **Figura 5-2**), verificatosi solo nell'ultimo mese di misura (dopo il 20/12/2023); conseguentemente, il grafico del movimento per sommatoria mostra attualmente valori di deformazione che, a partire da 12 m, crescono leggermente arrivando ad un valore massimo di circa 2 mm a p.c. (0.5 m di profondità) (**Figura 5-3** ()); l'azimut di tale deformazione (inteso come l'angolo tra la sommatoria ed Est misurato in senso antiorario) mostra un valore di 331°, corrispondente ad un azimut reale (rispetto a Nord in senso orario) pari a 119° (ESE), eventualmente compatibile con un movimento gravitativo del versante, esposto grosso modo a Est.
- **SN06bis-IN** (profondità del tubo inclinometrico 28.5 m): il grafico del movimento per punti rispetto all'origine mostrava uno spostamento di 0.7 mm a 8 m di profondità già nella prima misura del 24/07/2023 (**Figura 5-4**), tuttavia senza mostrare una progressione di tale spostamento negli ultimi mesi, con un massimo misurato nell'ultima lettura di circa 1.3 mm a 0.5 m di profondità (**Figura 5-5**); l'azimut di tale deformazione mostra un valore di 17°, corrispondente ad un azimut reale pari a 73° (ENE), eventualmente compatibile con un movimento gravitativo del versante, esposto grosso modo a Est.
- **SN07-IN** (profondità del tubo inclinometrico 30 m): in questo ultimo caso il grafico del movimento per punti rispetto all'origine non mostra spostamenti apprezzabili lungo tutta la verticale (**Figura 5-6**); il grafico del movimento per sommatoria mostra un aumento graduale della deformazione da fondo foro fino a p.c., con un valore massimo misurato nell'ultima lettura di circa 1 mm a 0.5 m di profondità (**Figura 5-7**); pertanto, in quest'ultima verticale non è presente nessun indizio di una eventuale superficie di scivolamento.

|  |  |   |                 |          |
|--|--|---|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |   | REV.            | FOGLIO   |
|  | MANDATARIA<br> <b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> <b>EITVA</b><br>ENERGIA VALLE D'AOSTA<br> <b>sinèrgo</b><br> <b>D-V</b><br>D Vision Architecture | A               | 65 di 72 |
|  |  |   | Data<br>02/2024 |          |

### 8.3.7 Monitoraggio piezometrico

Nell'area di frana sono stati realizzati n. 3 piezometri a tubo di profondità pari a 15 m (SN06-PZ, SN06bis-PZ, SN07-PZ). Nella **Tabella 5-9** e nel grafico di **Figura 5-8** sono stati riportati i risultati di tutte le misure finora eseguite.

In sintesi, risultati delle misure del livello piezometrico nei tre piezometri sono i seguenti:

- SN06-PZ: i risultati mostrano una soggiacenza del livello piezometrico variabile tra un massimo 3.76 m da p.c. (agosto 2023) e un minimo di 0.95 m da p.c. (dicembre 2023);
- SN06bis-PZ: i risultati mostrano in questo caso una soggiacenza del livello piezometrico variabile tra un massimo di 1.50 m da p.c. (settembre 2023) e un minimo di 0.55 m da p.c. (dicembre 2023);
- SN07-PZ: i risultati mostrano una soggiacenza del livello piezometrico variabile tra un massimo 4.30 m da p.c. (ottobre 2023) e un minimo di 1.75 m da p.c. (dicembre 2023 – gennaio 2024).

### 8.4 Back-analysis del fenomeno franoso

Sulla base di tutti i dati sopra riportati, nell'eventualità che la frana sia attiva, è stata impostata un'analisi di stabilità a ritroso (back-analysis) con la finalità di determinare il valore della resistenza lungo la superficie di scorrimento. Tale analisi, eseguita con il programma di calcolo *Slide 6.0 (Rocscience inc.)*, che consente, nell'ambito dei metodi all'equilibrio limite per conci (nel caso specifico è stato utilizzato il metodo di Janbu semplificato), di calcolare il coefficiente di sicurezza anche per una singola superficie di rottura stabilita dall'utente, è stata impostata sulla base delle seguenti condizioni:

- estensione monte-valle della frana attiva di oltre 600 m (come da cartografia PAI);
- versante in frana caratterizzato da una pendenza media della superficie topografica di circa 7÷8°;
- superficie di scivolamento a profondità media pari a 8 m (cfr. inclinometro SN06bis-IN) almeno nel tratto più a valle della stessa, ipotizzata grosso modo parallela al pendio vista l'estensione della frana;
- condizioni piezometriche variabili tra pendio saturo e pendio asciutto (ovvero livello piezometrico ipotizzato al di sotto della superficie di scorrimento).

In particolare, nelle condizioni di pendio saturo, il valore dell'angolo di attrito residuo per il quale il coefficiente di sicurezza assume valore unitario risulta essere pari a circa 13.5° (cfr. **Figura 8-15** e **Figura 8-16**), mentre nelle condizioni corrispondenti a quelle misurate nella recente campagna di monitoraggio piezometrico, il valore dell'angolo di attrito residuo risulta essere pari a circa 10.5° (cfr. **Figura 8-17** e **Figura 8-18**). Infine, dato che la forma della superficie di scorrimento, ipotizzata grosso modo parallela al versante, risulta schematizzabile con il modello del *pendio indefinito*, in condizioni di pendio asciutto valore dell'angolo di attrito residuo si approssima a quello della pendenza media della superficie topografica, risultano pari a circa 7° (cfr. **Figura 8-19** e **Figura 8-20**).

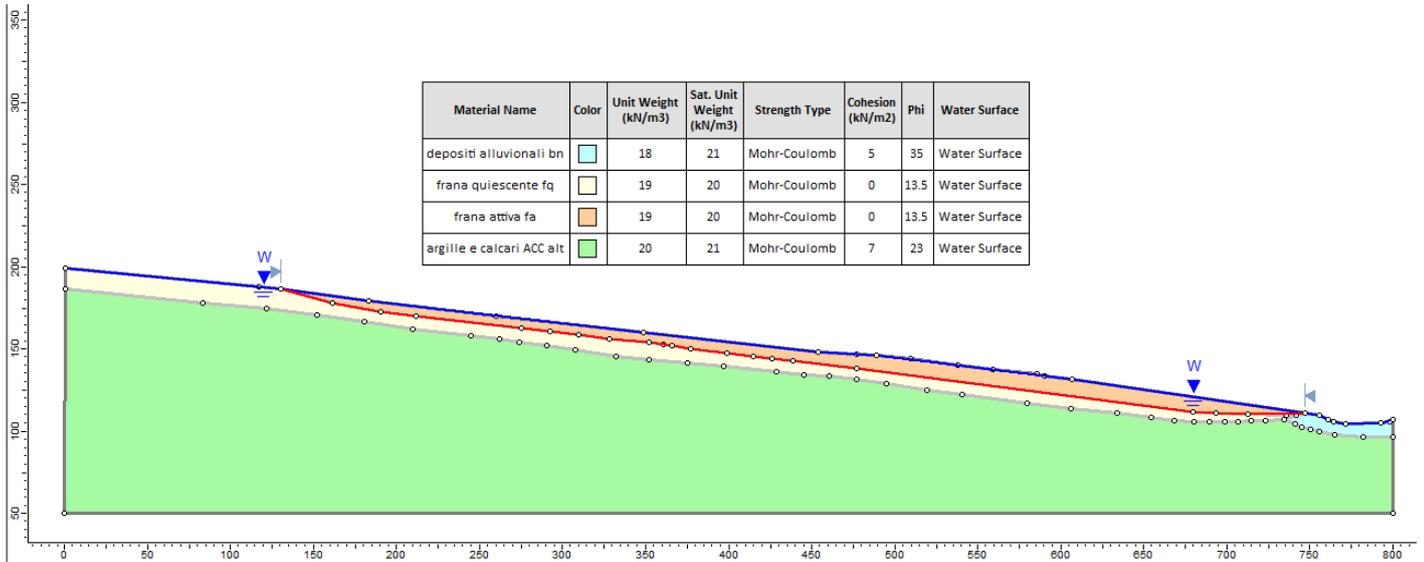


Figura 8-15 – Back-analisi fenomeno franoso – Condizioni di pendio saturo – Modello di calcolo

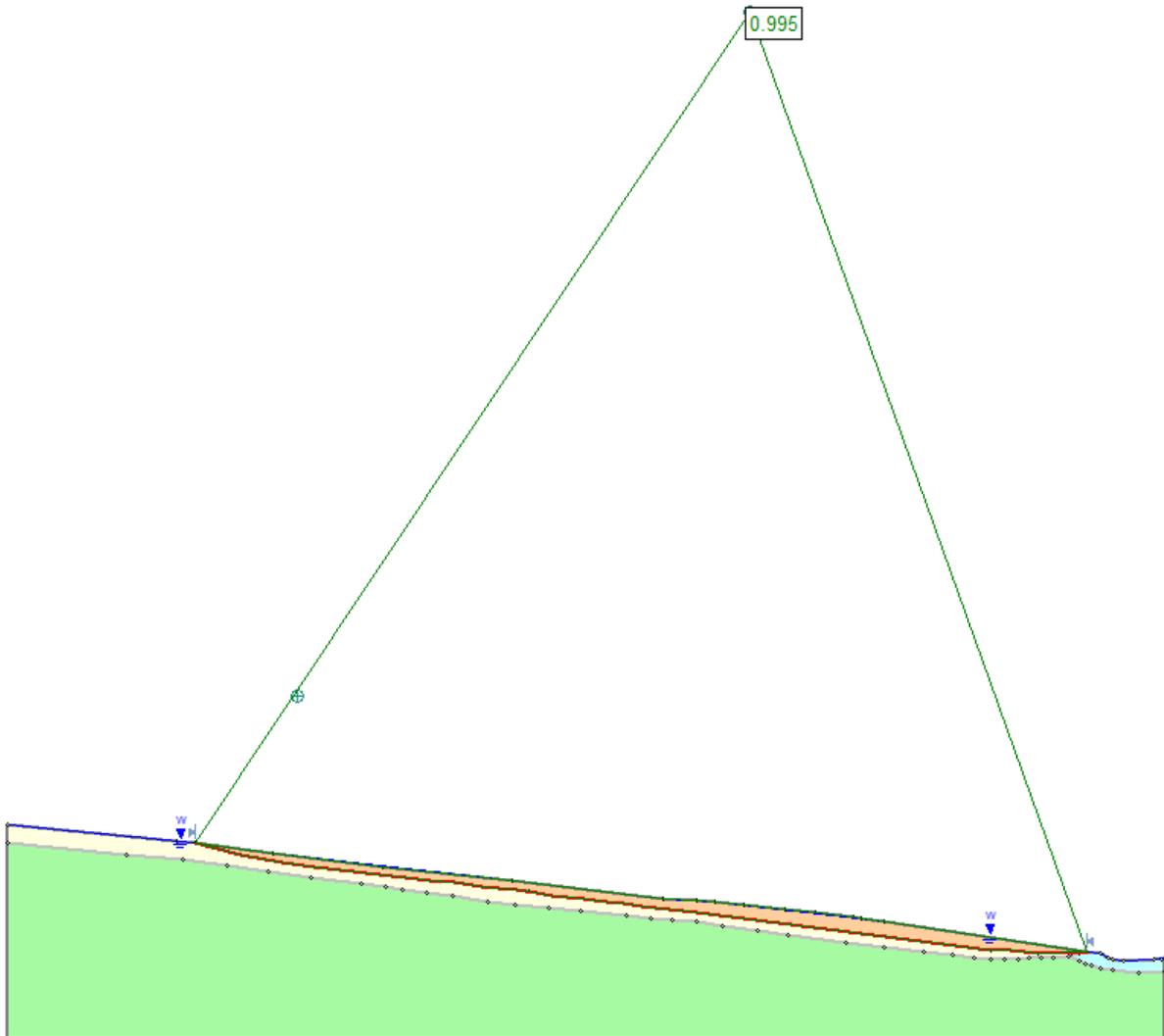
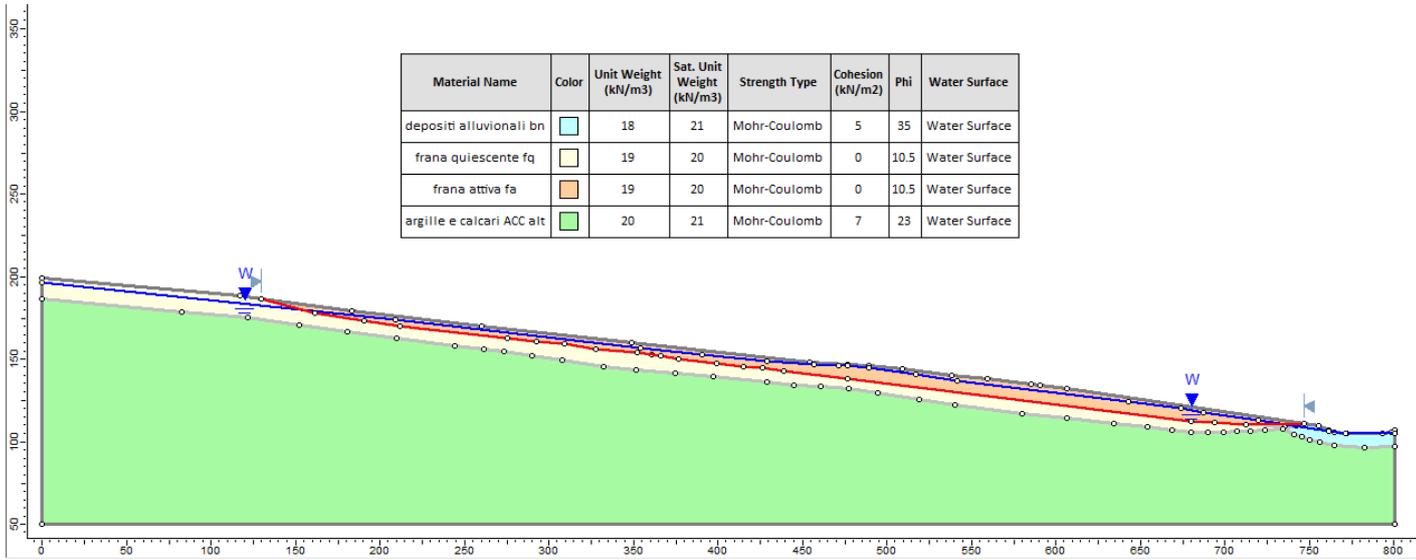
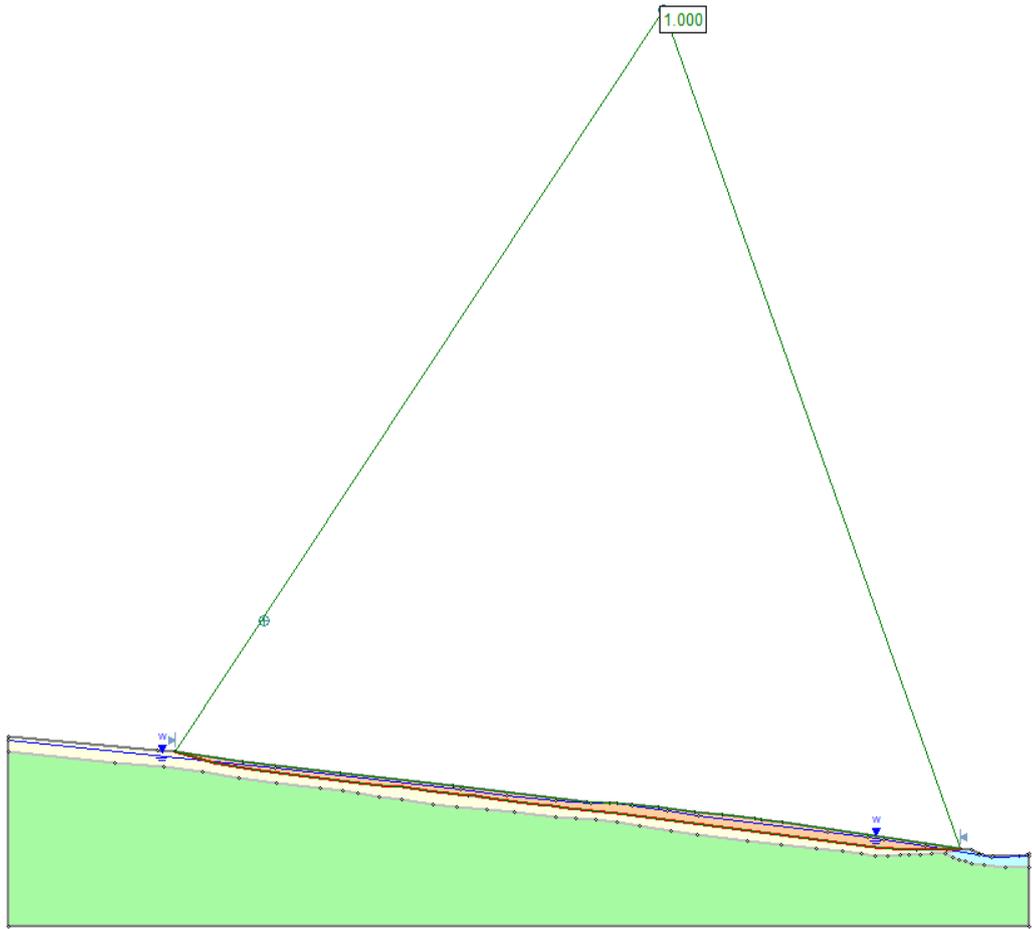


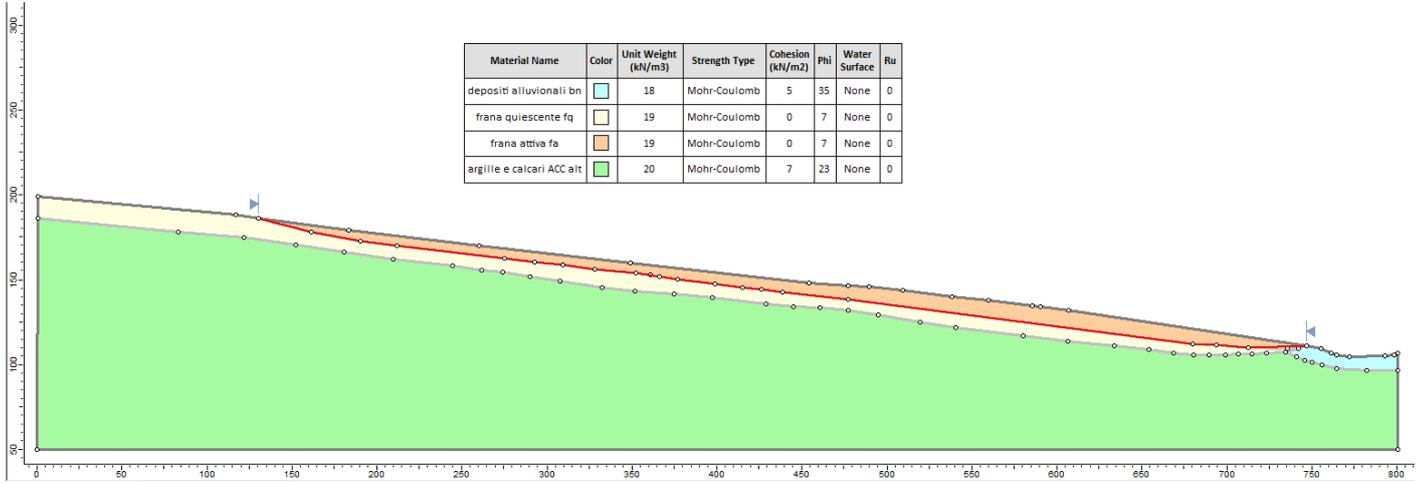
Figura 8-16 – Back-analisi fenomeno franoso – Condizioni di pendio saturo – Risultati



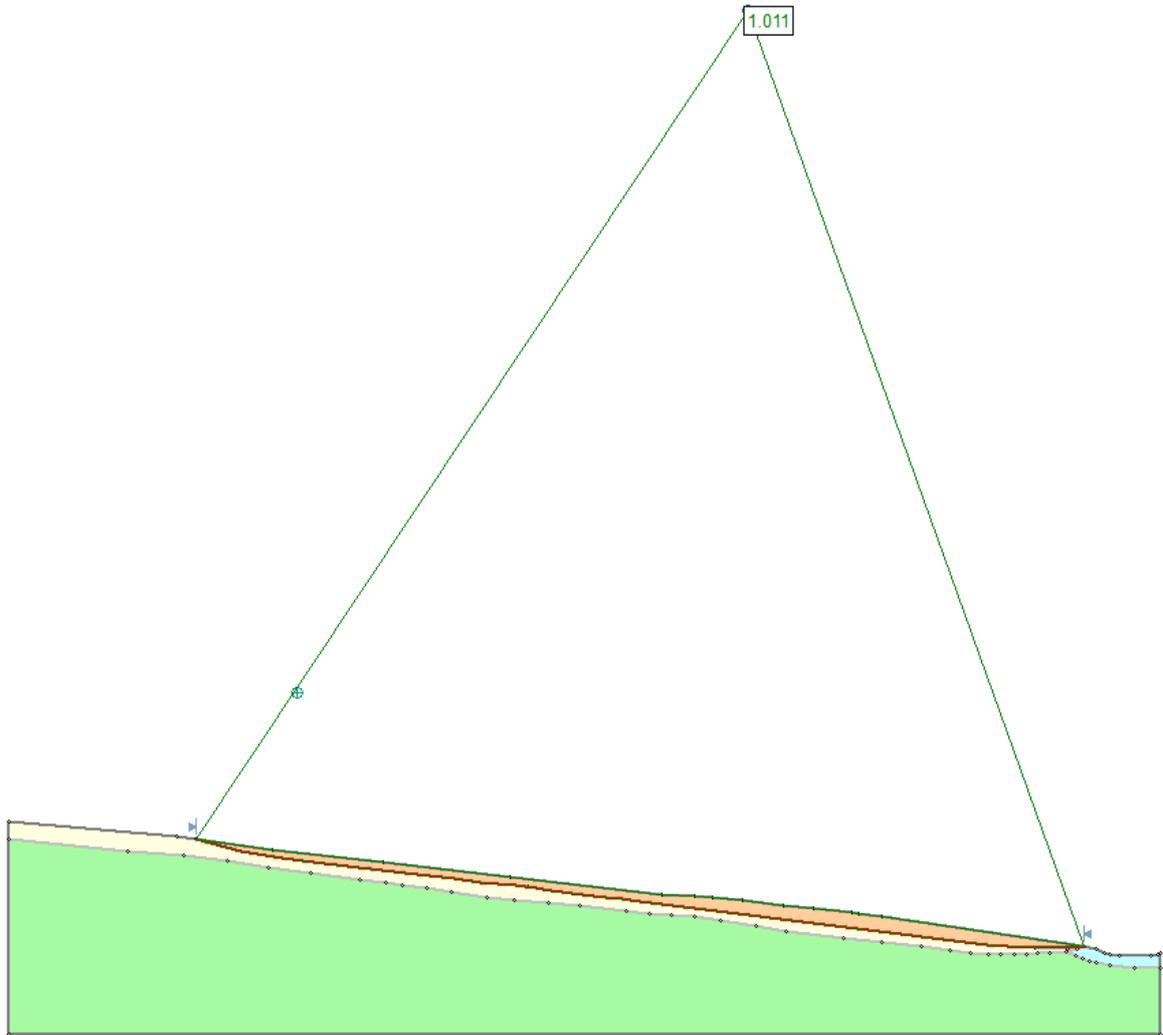
**Figura 8-17 – Back-analisi fenomeno franoso – Condizioni di pendio parzialmente saturo – Modello di calcolo**



**Figura 8-18 – Back-analisi fenomeno franoso – Condizioni di pendio parzialmente saturo – Risultati**



**Figura 8-19 – Back-analisi fenomeno franoso – Condizioni di pendio asciutto – Modello di calcolo**



**Figura 8-20 – Back-analisi fenomeno franoso – Condizioni di pendio asciutto - Risultati**

|  |  |  |   |        |
|--|--|--|---|--------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE  |  | REV.  | FOGLIO |
|  | MANDATARIA<br> PRO<br>ITER<br>Progetto<br>Infrastrutture<br>Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVA s.p.a.<br>ENERGIA VALIGIA AMBIENTE |  sinèrgo | A      |
|  |  |  | Data<br>02/2024   |        |

## 8.5 Sintesi conclusiva

Dagli esiti di tutte le indagini eseguite nell'area di frana e sopra descritte emerge un quadro riassumibile nei seguenti punti principali:

- la frana, ubicata in destra idrografica del fiume Sieve:
  - dal *Catalogo IFFI – Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia* viene classificata come *scivolamento rotazionale/traslato*, con *stato di attività n.d. (non determinato)*;
  - dalla *Banca Dati geomorfologica della Regione Toscana (sito web GEOscopio della Regione Toscana)*, viene classificata come *frana di scorrimento (velocità indeterminata)*, con *stato di attività indeterminata*;
  - dal *PAI dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale – Bacino del Fiume Arno*, viene classificata come *frana a pericolosità molto elevata PF4*;
  - dal *PAI dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale – Progetto di Piano - PAI "Dissesti geomorfologici"*, il dissesto viene classificato come *area a pericolosità molto elevata P4, scivolamento/colata lenta, attiva (S3)*, che continua a monte come *scivolamento/colata lenta, inattiva potenzialmente instabile (S2)*;
- per quest'area sono disponibili i dati di velocità media annua di alcuni PS registrate dal satellite ERS nel periodo 1992-2000, dal satellite ENVISAT nel periodo 2003-2010 e dal satellite SENTINEL-1 a partire dal 2014; in corrispondenza del piede della frana, dove sono presenti alcuni edifici, sono presenti sia alcuni PS che indicano una sostanziale stabilità (velocità comprese tra -1.9÷-2 mm/anno registrate con Envisat ascendente e Sentinel sia ascendente che discendente), sia un unico PS che indica una velocità compresa tra -4.9 e -2 mm/anno (Envisat ascendente); dato che il versante in esame è esposto ad Est e che quindi la traiettoria in grado di meglio descrivere l'eventuale movimento è quella ascendente, il dato di velocità relativo al satellite Envisat ascendente deve essere considerato con particolare attenzione.
- le stratigrafie dei n. 3 sondaggi eseguiti nell'area, insieme con gli esiti delle prove SPT, hanno mostrato uno spessore di terreno che, nella sua porzione più superficiale fino a 10÷15 m di profondità, potrebbe essere potenzialmente riconducibile a depositi gravitativi di versante (frana attiva o quiescente);
- le indagini sismiche a rifrazione con misura delle  $V_P$  e delle  $V_S$  hanno consentito di individuare la presenza di tre sismostrati principali, il più superficiale ( $V_P < 1200\div 1500$  m/s,  $V_S < 300\div 400$  m/s), con uno spessore di 4÷8 m, potenzialmente assimilabile alla porzione attiva della frana, l'intermedio ( $V_P < 1900\div 2200$  m/s,  $V_S < 500\div 600$  m/s), con uno spessore di 8÷10 m circa, potenzialmente assimilabile alla porzione quiescente della frana, e quello più profondo ( $V_P \geq 1900\div 2200$  m/s,  $V_S \geq 500\div 600$  m/s), presente da profondità medie di 15÷20 m, assimilabile al substrato argillitico delle Argille e Calcari di Canetolo, da alterato a poco alterato;
- le indagini di tomografia elettrica ERT non sono risultate, nello specifico, particolarmente diagnostiche nell'individuazione di una potenziale superficie di scorrimento;
- gli esiti delle n. 4 prove con dilatometro piatto Marchetti eseguite, a causa della lunghezza estremamente ridotta delle prove e della mancanza del tratto inferiore sovraconsolidato, non hanno consentito di individuare con sicurezza la presenza di una eventuale superficie di scivolamento (attiva o quiescente);
- il monitoraggio eseguito sui n. 3 piezometri installati nell'area ha mostrato valori di soggiacenza del livello piezometrico della falda superficiale variabili tra 0.5 e 4 m circa da p.c.;

|  |   |   |   |        |
|--|---|---|---|--------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |   | REV.  | FOGLIO |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVA<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA s.r.l. |  sinèrgo | A      |
|  |   |   | Data<br>02/2024   |        |

- il monitoraggio eseguito sui n. 3 inclinometri installati nell'area non ha mostrato chiari indizi di una superficie di scivolamento attiva su tutte e tre le verticali; tuttavia, su due verticali (SN06bis-IN e SN06-IN) sembrerebbe possibile individuare una potenziale superficie di scivolamento attiva rispettivamente a 8 e 12 m di profondità;
- le prove di taglio diretto eseguite in laboratorio sui campioni della porzione più superficiale dei depositi di frana (profondità < 7 m), hanno fornito valori di resistenza a taglio di picco pari a  $c'_p = 7$  kPa,  $\varphi'_p = 26 \div 34^\circ$  e valori di resistenza a taglio residui pari a  $c'_r = 0$  kPa,  $\varphi'_r = 25 \div 28^\circ$ ;
- i valori ottenibili da una back-analysis del fenomeno franoso eseguita sulla base delle seguenti condizioni:
  - estensione monte-valle della frana attiva di oltre 600 m (come da cartografia PAI);
  - versante in frana caratterizzato da una pendenza media della superficie topografica di circa  $7 \div 8^\circ$ ;
  - superficie di scivolamento a profondità media pari a 8 m (cfr. inclinometro SN06bis-IN) almeno nel tratto più a valle della stessa, ipotizzata grosso modo parallela al pendio vista l'estensione della frana;
  - condizioni piezometriche variabili tra pendio saturo e pendio asciutto (ovvero livello piezometrico ipotizzato al di sotto della superficie di scorrimento);

hanno fornito un valore dell'angolo di attrito residuo pari a circa  $13.5^\circ$  in condizioni di pendio saturo, un valore pari a circa  $10.5^\circ$  nelle condizioni corrispondenti a quelle misurate nella recente campagna di monitoraggio piezometrico e un valore pari a  $7^\circ$  in condizioni di pendio asciutto; tali valori possono essere considerati rappresentativi unicamente della resistenza residua presente in corrispondenza della superficie di scorrimento della frana, dato che risultano molto inferiori ai valori residui ottenuti da prove di taglio diretto su campioni indisturbati prelevati nel corpo della frana a profondità inferiori a 7 m.

Tuttavia, richiamato quanto prevedono le Norme di Attuazione del PAI all'Art. 10 per le Aree a pericolosità molto elevata da processi geomorfologici di versante e da frana, ovvero.

*“Nelle aree P.F.4, per le finalità di cui al presente PAI, sono consentiti, purché nel rispetto del buon regime delle acque:*

- a. *interventi di consolidamento, sistemazione e mitigazione dei fenomeni franosi, nonché quelli atti a indagare e monitorare i processi geomorfologici che determinano le condizioni di pericolosità molto elevata, previo parere favorevole dell'Autorità di Bacino sulla conformità degli interventi con gli indirizzi dalla stessa fissati;*
- b. *interventi necessari per la manutenzione di opere pubbliche o di interesse pubblico;*
- c. *interventi di ristrutturazione delle opere e infrastrutture pubbliche nonché della viabilità e della rete dei servizi privati esistenti non delocalizzabili, purché siano realizzati senza aggravare le condizioni di instabilità e non compromettano la possibilità di realizzare il consolidamento dell'area e la manutenzione delle opere di consolidamento;*

[...]

- h. *nuovi interventi relativi a opere pubbliche o di interesse pubblico, non diversamente localizzabili, a condizione che siano preventivamente realizzate le opere funzionali al consolidamento e alla bonifica del movimento franoso previo parere favorevole dell'Autorità di Bacino sulla conformità di tali interventi con gli indirizzi dalla stessa fissati.”*

una progettazione geotecnica degli eventuali interventi di consolidamento e bonifica del movimento franoso che consideri un'estensione come quella indicata dalla cartografia PAI, una profondità media di 8 m come suggerito da

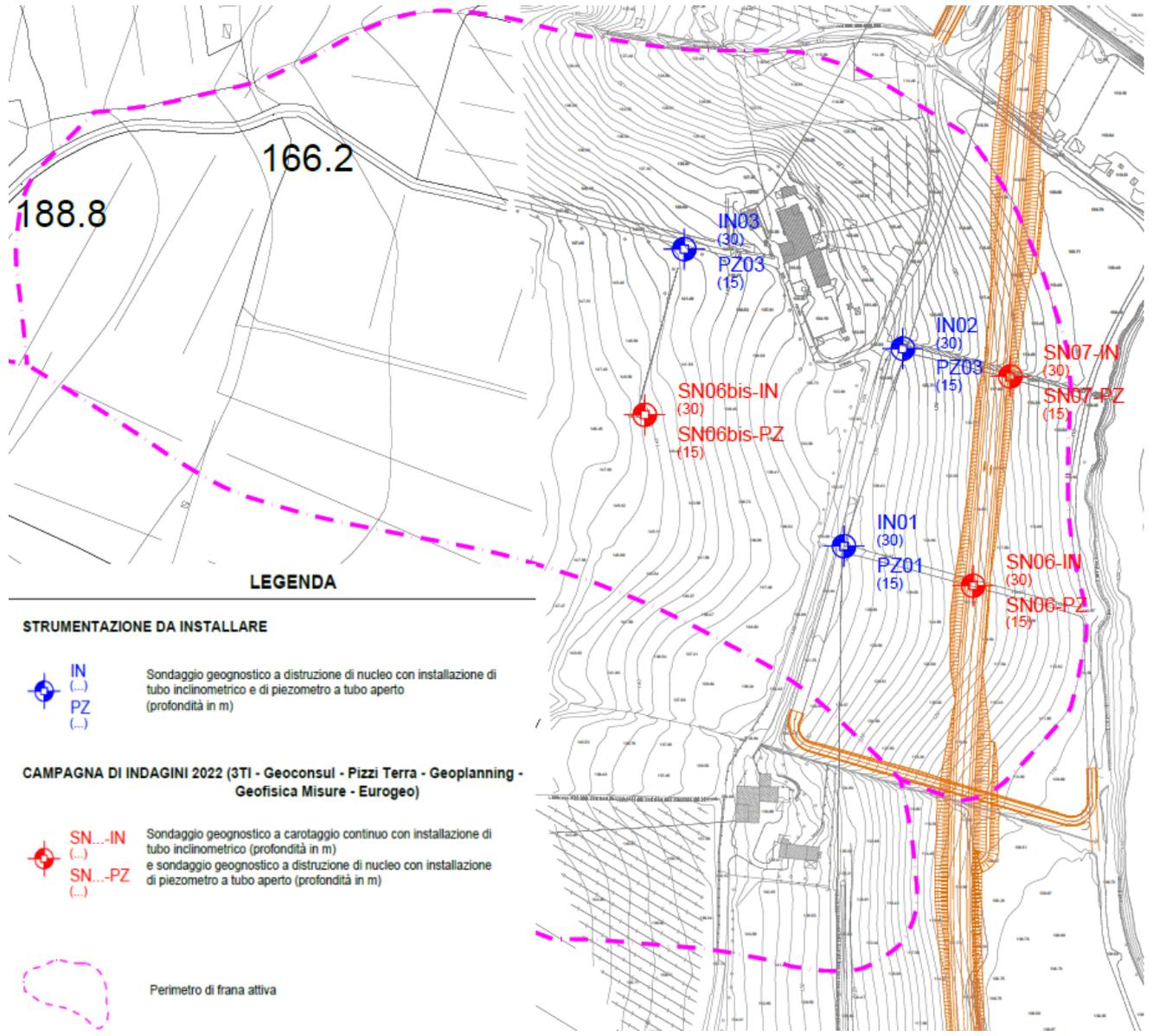
|  |   |  |   |   |                    |
|--|---|--|---|---|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T 00-GE 01-GEO-RE 10 | PROGETTAZIONE   |  |   | REV.<br>A   | FOGLIO<br>71 di 72 |
|  | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVIA s.r.l.<br>ENERGIA VALLE D'AOSTA |  sinèrgo |  D-VisionArchitecture |                    |
|  |   |  |   |   | Data<br>02/2024    |

uno dei tre inclinometri disponibili per l'area, dei parametri di resistenza come quelli indicati dalle back-analysis di cui sopra, non appare realisticamente praticabile.

Pertanto, stante l'attuale indeterminatezza sulla reale attività della frana, sulla sua profondità e sulla sua effettiva estensione, l'interferenza dell'infrastruttura in progetto con la frana è stato affrontato con un approccio di questo tipo:

- ottimizzazione della livelletta stradale in modo da limitare il più possibile l'altezza degli scavi e dei rilevati all'interno del corpo della frana, a scapito di un modesto incremento della pendenza longitudinale del tracciato;
- evitare il ricorso a opere di sostegno rigide (muri o paratie in c.a.) in quanto soggette a spinte notevoli che causerebbero fessurazioni e/o rotture delle opere;
- inserimento di tubi drenanti suborizzontali sulla scarpata di scavo ( $H_{max} < 4$  m) presente a monte della sede stradale, e contestuale realizzazione di uno strato di anticapillare al di sotto della fondazione stradale in trincea, in modo da contrastare l'eventuale risalita della superficie piezometrica in corrispondenza della sede stradale;
- predisposizione di una rete di monitoraggio geotecnico dell'area di frana a cavallo della sede stradale, prevedendo la realizzazione di inclinometri e piezometri con misure manuali da eseguire a cadenza almeno trimestrale, in modo da tenere sotto controllo l'eventuale tendenza evolutiva della frana, anche in relazione a periodi di precipitazioni intense e prolungate nel tempo (cfr. **Figura 8-21**);
- prevedere costantemente, in funzione degli esiti del monitoraggio geotecnico, un'attività di controllo e manutenzione della pavimentazione e del corpo stradale, in modo da assicurare in ogni momento le necessarie condizioni di sicurezza per l'utenza.

|   |   |  |  |  |                        |                    |
|---|---|--|--|--|------------------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T 00-GE 01-GEO-RE 10</b> | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastruttura Territorio s.r.l. |  | MANDANTI<br><b>ETA</b><br>ENERGIA VALLE D'AGOSTO |  | REV.<br><b>A</b>       | FOGLIO<br>72 di 72 |
|   | <b>sinèrgo</b><br>D_VA<br>D_VisionArchitecture  |  |  |  | Data<br><b>02/2024</b> |                    |



**Figura 8-21** – Piano di monitoraggio geotecnico dell'area di frana tra le p.k. 0+925 e 1+300: ubicazione della strumentazione prevista