

**E 78 GROSSETO - FANO
TRATTO SELCI - LAMA (E 45) - S.STEFANO DI GAIFA
Adeguamento a 2 corsie del tratto Mercatello sul Metauro Ovest -
Mercatello sul Metauro Est (Lotto 4°)**

PROGETTO DEFINITIVO

AN 245

ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

| | | |
|--|--|--|
| <p>COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE</p> <p><i>Ing. Giuseppe Resta</i></p> <p>Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 20629</p> | <p>I PROGETTISTI SPECIALISTICI</p> <p><i>Ing. Ambrogio Signorelli</i></p> <p>Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. A35111</p> <p><i>Ing. Moreno Panfili</i></p> <p>Ordine Ingegneri Provincia di Perugia n. A2657</p> <p><i>Ing. David Crenca</i></p> <p>Ordine Ingegneri Provincia di Frosinone n. A1762</p> <p><i>Ing. Giuseppe Resta</i></p> <p>Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 20629</p> | <p>PROGETTAZIONE ATI: (Mandataria)</p> <p>GPI INGEGNERIA <i>GESTIONE PROGETTI INGEGNERIA srl</i></p> <p>(Mandante)</p> <p> cooprogetti</p> <p>(Mandante)</p> <p> engeko</p> <p>(Mandante)</p> <p> Studio di Architettura e Ingegneria Moderna</p> <p>IL PROGETTISTA E RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE. (DPR207/10 ART 15 COMMA 12) :</p> <p><i>Dott. Ing. GIORGIO GUIDUCCI</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 14035</p> <div style="border: 2px solid blue; padding: 5px; display: inline-block;"> <p><i>Dott. Ing. GIORGIO GUIDUCCI</i> ORDINE INGEGNERI ROMA N° 14035</p> </div> |
| <p>IL GEOLOGO</p> <p><i>Dott. Geol. Salvatore Marino</i></p> <p>Ordine dei geologi della Regione Lazio n. 1369</p> | | |
| <p>VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO</p> <p><i>Ing. Vincenzo Catone</i></p> | | |
| <p>VISTO: IL RESP. DEL PROGETTO</p> <p><i>Arch. Pianif. Marco Colazza</i></p> | | |

**STUDI ED INDAGINI
GEOLOGIA GEOTECNICA
Geologia
Relazione di compatibilità geomorfologica**

| | | | | | | | |
|-----------------|--|-----------|------------------------------------|---------|------------|-----------|---|
| CODICE PROGETTO | | NOME FILE | | | REVISIONE | SCALA | |
| PROGETTO | LIV.PROG | ANNO | T00GE01GEORE02A. | | | | |
| D | D | 22 | CODICE ELAB. T00GE01GEORE02 | | | A | - |
| D | | | | | | | |
| C | | | | | | | |
| B | | | | | | | |
| A | Integrazione per richiesta MASE U.0003360 del 12.03.2024 | | Marzo '24 | Marino | Marino | Guiducci | |
| REV. | DESCRIZIONE | | DATA | REDATTO | VERIFICATO | APPROVATO | |

INDICE

| | | |
|-----------|---|------------------|
| 1. | <u>PREMESSA.....</u> | <u>2</u> |
| 2. | <u>NORMATIVE E RACCOMANDAZIONI TECNICHE.....</u> | <u>3</u> |
| 3. | <u>INQUADRAMENTI.....</u> | <u>4</u> |
| 3.1. | INQUADRAMENTO GEOGRAFICO..... | 4 |
| 3.2. | INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRATIGRAFICO E TETTONICO..... | 4 |
| 3.3. | SUCCESSIONE STRATIGRAFICA DI RIFERIMENTO..... | 9 |
| 3.3.1. | <i>FORMAZIONE MARNOSO-ARENACEA ROMAGNOLA.....</i> | <i>9</i> |
| 3.3.2. | <i>DEPOSITI CONTINENTALI QUATERNARI.....</i> | <i>16</i> |
| 3.4. | SCHEMA IDROGEOLOGICO..... | 17 |
| 3.4.1. | <i>COMPLESSI IDROGEOLOGICI.....</i> | <i>18</i> |
| 3.4.2. | <i>RICOSTRUZIONE PIEZOMETRICA.....</i> | <i>19</i> |
| 3.5. | SCHEMA GEOMORFOLOGICO..... | 20 |
| 4. | <u>INTERFERENZA AREA PAI F-05-3488.....</u> | <u>24</u> |
| 5. | <u>INDAGINI SPECIFICHE PER AREA PAI F-05-3488.....</u> | <u>25</u> |
| 5.1. | INDAGINI GEOGNOSTICHE..... | 26 |
| 5.2. | LABORATORIO GEOTECNICO..... | 28 |
| 5.3. | INDAGINI SISMICHE..... | 29 |
| 6. | <u>INTERFERENZA PAI F-05-3488.....</u> | <u>30</u> |
| 7. | <u>INTERVENTO DI STABILIZZAZIONE FRANA COMPLESSA CO2.....</u> | <u>35</u> |
| 7.1. | CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA..... | 35 |
| 7.2. | INTERVENTI DI PROGETTO PREVISTI..... | 35 |
| 7.2.1. | <i>ANALISI DELLE CONDIZIONI DI ATTIVAZIONE DEI MECCANICISMI DI INSTABILITÀ (ANTE OPERAM).....</i> | <i>35</i> |
| 7.2.2. | <i>ANALISI DELLE CONDIZIONI DI STABILITÀ IN PRESENZA DEGLI INTERVENTI (POST OPERAM).....</i> | <i>38</i> |
| 7.3. | SCENARIO DI RIFERIMENTO PER LA PROGETTAZIONE DELLE OPERE DI LINEA..... | 39 |
| 8. | <u>CONCLUSIONI.....</u> | <u>39</u> |

1. PREMESSA

La presente relazione analizza gli elementi per la compatibilità geologica e geomorfologica delle opere relative al Progetto Definitivo “S.G.C. E78 GROSSETO - FANO – Tratto Selci lama (E/45) - S. Stefano di Gaifa - Adeguamento a 2 corsie del tratto Mercatello sul Metauro Ovest - Mercatello sul Metauro Est (Lotto 4°)” che si sviluppa interamente all’interno del territorio comunale di Mercatello sul Metauro (PU).

Il presente studio è stato condotto a partire dalla consultazione degli elaborati pregressi che ANAS ha condotto nelle fasi progettuali precedenti all’attuale, in particolare gli elaborati del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica relativo alla “S.G.C. E78 GROSSETO-FANO – Tratto Selci Lama-Mercatello sul Metauro – Lotto 4° di Mercatello sul Metauro”.

Inoltre sono stati presi in esame i rilievi geologici di campo, i dati delle campagne geognostica, ambientale e geofisica, con particolare attenzione agli aspetti geomorfologico-gravitativi.

Il tracciato di Progetto interferisce con l’area PAI F-05-3488 classificata a grado di pericolosità P2 (media) e rischio R1 (moderato).

Alla luce delle verifiche di campo sullo stato del corpo di frana individuato dal PAI, e dalla verifica dei dati di progetto, il presente Studio di Compatibilità Geomorfologica tende a descrivere e ad analizzare la fattibilità dell’opera relazionata alle caratteristiche geomorfologiche dell’area interessata, mostrando:

- la compatibilità del progetto con quanto previsto dal PAI;
- che le attività in progetto non alterino la sicurezza del territorio.

L’analisi della compatibilità geomorfologica è stata effettuata sulla base delle indicazioni delle “Norme di Attuazione”, Elaborato “d” PAI Autorità di Bacino Regione Marche come previsto nell’art. 12 comma 5.

La documentazione facente parte del presente lavoro è costituita dai seguenti elaborati, compresa la presente relazione e gli elaborati della sezione Sismica, sono riportati i codici degli elaborati di cui si farà riferimento nella seguente relazione e le scale per gli elaborati grafici.

- T00GE01GEORE01 Relazione Geologica
- T00GE01GEOCG01 Carta Geologica - Tav. 1 di 3 - 1:2.000
- T00GE01GEOCG02 Carta Geologica - Tav. 2 di 3 - 1:2.000
- T00GE01GEOCG03 Carta Geologica - Tav. 3 di 3 - 1:2.000
- T00GE01GEOCG04 Carta Geomorfologica - Tav. 1 di 3 - 1:2.000
- T00GE01GEOCG05 Carta Geomorfologica - Tav. 2 di 3 - 1:2.000
- T00GE01GEOCG06 Carta Geomorfologica - Tav. 3 di 3 - 1:2.000
- T00GE01GEOCI01 Carta Idrogeologica - Tav. 1 di 3 - 1:2.000
- T00GE01GEOCI02 Carta Idrogeologica - Tav. 2 di 3 - 1:2.000
- T00GE01GEOCI03 Carta Idrogeologica - Tav. 3 di 3 - 1:2.000
- T00GE01GEOCG07 Carta aree a pericolosità e rischio PAI - Tav. 1 di 3 - 1:2.000
- T00GE01GEOCG08 Carta aree a pericolosità e rischio PAI - Tav. 2 di 3 - 1:2.000
- T00GE01GEOCG09 Carta aree a pericolosità e rischio PAI - Tav. 3 di 3 - 1:2.000
- T00GE01GEOFG01 Profilo Geologico - Tav. 1 di 3 - 1:2.000/2.000
- T00GE01GEOFG02 Profilo Geologico - Tav. 2 di 3 - 1:2.000/2.000
- T00GE01GEOFG03 Profilo Geologico - Tav. 3 di 3 - 1:2.000/2.000
- T00GE01GEOSG01 Sezioni Geologiche - Tav. 1 di 4 - 1:500

PROGETTAZIONE ATI:

- T00GE01GEOSG02 Sezioni Geologiche - Tav. 2 di 4 - 1:500
- T00GE01GEOSG03 Sezioni Geologiche - Tav. 3 di 4 - 1:500
- T00GE01GEOSG04 Sezioni Geologiche - Tav. 4 di 4 - 1:500
- T00GE02GEORE01 Relazione Sismica
- T00GE02GEOCS01 Planimetria con classificazione sismica del territorio - 1:5.000
- T00GE00GEORE01 Risultati campagna indagini pregresse
- T00GE00GEORE02 Documentazione indagini geognostiche - Sondaggi geognostici e prove in sito
- T00GE00GEORE03 Documentazione indagini geognostiche - Risultati indagini geofisiche
- T00GE00GEORE04A Documentazione indagini geognostiche - Analisi e prove di laboratorio geotecnico
- T00GE00GEORE05 Monitoraggio inclinometrico e piezometrico
- T00GE00GEOPU01 Planimetria ubicazione indagini tav. 1 di 3 - 1:2.000
- T00GE00GEOPU02 Planimetria ubicazione indagini tav. 2 di 3 - 1:2.000
- T00GE00GEOPU03A Planimetria ubicazione indagini tav. 3 di 3 - 1:2.000

2. NORMATIVE E RACCOMANDAZIONI TECNICHE

La presente relazione e gli studi ad essa associati sono redatti in conformità a quanto previsto dalla normativa legislativa e tecnica vigente; di seguito sono elencati i principali riferimenti:

- D.M. 11/03/88: "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce.";
- D.M. 17/01/2018 Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni";
- Circolare 21/01/2019 "Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al DM17/01/2018";
- UNI EN 1997-1:2005 Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali. Versione in lingua italiana della norma europea EN1997-1;
- UNI EN 1997-1:2005 Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo. Versione in lingua italiana della norma europea EN1997-2;
- UNI EN 1998:2005 Eurocodice 8 – Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici. Versione in lingua italiana della norma europea EN1998.
- AGI – Associazione Geotecnica Italiana (2005) "Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica";
- A.G.I. (1977). "Raccomandazioni sulla Programmazione ed Esecuzione delle Indagini Geotecniche";
- A.G.I. (1994). "Raccomandazioni sulle Prove Geotecniche di Laboratorio";
- D.L. 11/05/99 n. 152: "Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della Direttiva CEE 91/271 e 91/676";
- D.L. 18/08/2000 n. 258: "Disposizioni correttive ed integrative del D.L. 152/99";
- D.L. 03/04/2006 n. 152: "Norme in materia ambientale";
- D.P.R. 13 giugno 2017, n. 120 "Regolamento recante la disciplina semplificata della gestione delle terre e rocce da scavo [...]"
- Capitolato Speciale di Appalto ANAS "Esecuzione di Indagini Geognostiche";
- Capitolato Speciale di Appalto ANAS "Indagini prove in situ e di laboratorio";
- Norme di attuazione PAI Autorità di Bacino - Regione Marche, Elaborato "d";
- D.M.LL.PP. 11/03/1988.

PROGETTAZIONE ATI:

3. INQUADRAMENTI

3.1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area oggetto di studio è ubicata nel settore nord-occidentale delle Marche, in provincia di Pesaro-Urbino, a breve distanza del confine regionale con l'Umbria, nei pressi immediati dell'abitato di Mercatello sul Metauro, nel cui territorio comunale si sviluppa l'intero progetto (Figura 3-1).

Il tracciato si sviluppa da WSW a ENE, attraversando dapprima la piana del Torrente Sant'Antonio, affluente di destra del fiume Metauro, per circa 1350 m, per poi attraversare in sotterraneo, attraverso due gallerie, le colline che bordano l'area a sud della confluenza tra il torrente e il corso d'acqua principale, per circa 1250 m. La parte finale del tracciato si sviluppa in destra idrografica del Fiume Metauro, sulla sua piana alluvionale, per circa 1500 m.

Il territorio attraversato è a vocazione prevalentemente agricola nei tratti di piana e boschivo nelle aree collinari.

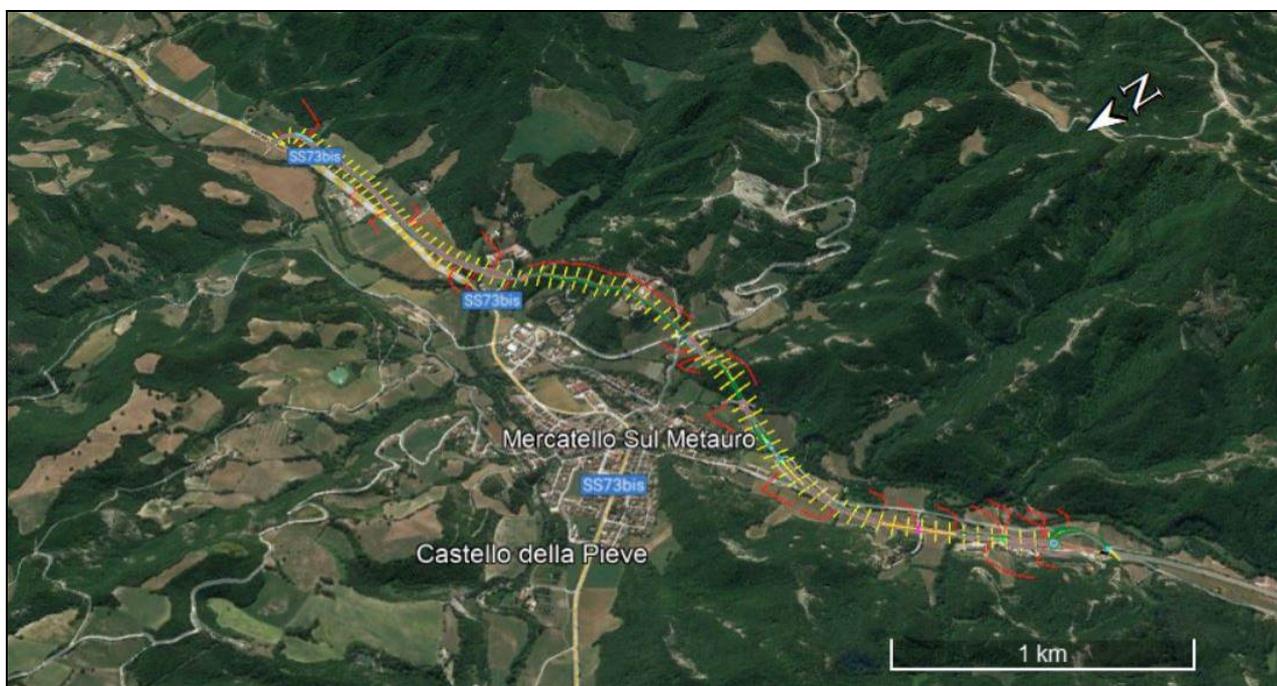


Figura 3-1 Inquadramento geografico dell'area d'intervento, da Google Earth

3.2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRATIGRAFICO E TETTONICO

La Catena Appenninica (Figura 3-2) di cui il territorio di studio occupa una piccola parte ricadente nel settore settentrionale, è risultata dalla chiusura di un bacino oceanico (Tetide occidentale), formatosi nel Giurassico tra le Placche Europea e Africana, e dalla successiva deformazione dei suoi resti (Unità Liguridi) e dei suoi margini continentali. L'assetto geologico-strutturale attuale è stato determinato da una serie di fasi, iniziate nel Triassico, che hanno portato alla formazione delle catene a pieghe Appenninica, Alpina e Dinarica. A partire dal Cretacico superiore inizia la convergenza tra i margini continentali delle due placche, formandosi una zona di subduzione che, nell'Eocene superiore, determina la totale completa consumazione del bacino oceanico interposto e la collisione tra il Blocco Sardo-Corso, posto sul margine della Placca Europea, e la Placca Adriatica, costituente un promontorio di quella africana incuneato in quella europea. Focalizzando l'attenzione sul territorio di interesse, a partire dal Triassico medio si depositano successioni tipiche di un margine passivo, denominate "Toscane" e "Umbro- Marchigiane" in base della distribuzione

PROGETTAZIONE ATI:

geografica delle unità tettoniche di appartenenza. Nel corso dell'Oligocene-Miocene questo margine diviene attivo negli ultimi stadi della convergenza tra la Placca Europea (Blocco Sardo-Corso) e la Placca Adria (Appennino Settentrionale).

Durante la collisione, sulle Unità Toscane giungono le Unità Liguri, a loro volta già sovrapposte le une alle altre. Successivamente le Unità Toscane, con le sovrastanti Liguridi, si sovrappongono a loro volta alle Unità Umbro-Marchigiane, sedimentatesi più ad occidente. I meccanismi di costruzione di questo complesso edificio strutturale, costituito da una pila di unità tettoniche, di origine continentale, sormontata da unità di origine oceanica, probabilmente sono rappresentati da una serie di successivi sottoscorrimenti, inizialmente legati ad una zona di subduzione oceanica la cui immersione non è univocamente interpretata.

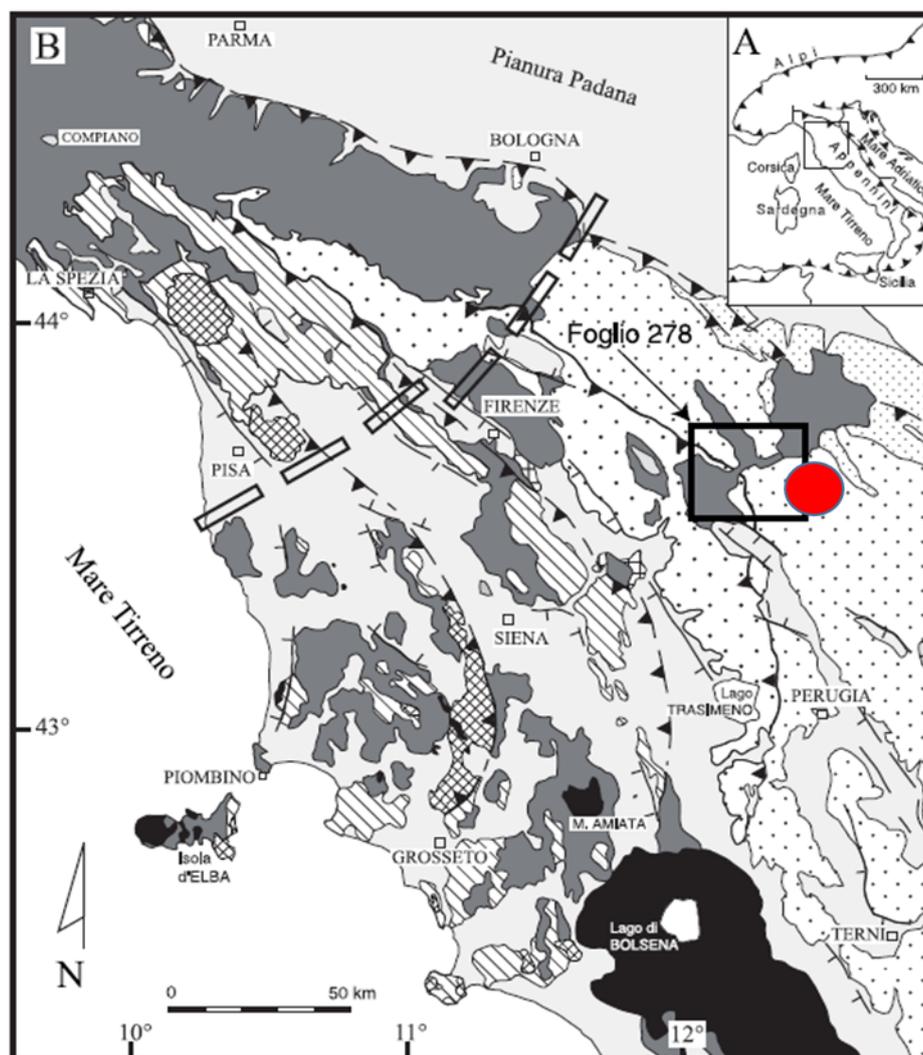


Figura 3-2 Schema geologico-strutturale dell'Appennino Settentrionale e relativa legenda (fonte: Note Illustrative Foglio 278 "Pieve Santo Stefano", Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000). L'area di studio è schematicamente individuata con il tondo di colore rosso.

Invece tutti gli autori concordano, per quanto riguarda le fasi collisionali ensialiche, su una vergenza verso est con inclinazioni verso ovest dei maggiori thrust crostali, processi che hanno portato alla

PROGETTAZIONE ATI:

costruzione dell'attuale edificio orogenico dell'Appennino Settentrionale. Nelle fasi più tardive hanno funzionato meccanismi di tipo prevalentemente gravitativo, che hanno fatto giungere le coltri liguri sulle Unità Umbro-Marchigiano-Romagnole più esterne.

La Figura 3-2 mostra in quale settore dell'Appennino Settentrionale ricade l'area di studio, in particolare all'interno di quale unità tettonica: si tratta del settore di affioramento delle Unità Umbro-Marchigiano-Romagnole, posto poco ad oriente delle Unità Cervarola-Falterona e a meridione delle Unità Liguri. La struttura generale delle Unità Umbro-Marchigiano-Romagnole è caratterizzata, come quella delle Unità Cervarola-Falterona più occidentali, da thrust e pieghe associate, sia anticlinali di tetto che sinclinali di muro, anche in assetto rovesciato. Nel settore di studio la successione Umbro-Marchigiano-Romagnola è rappresentata dalla sola formazione Marnoso-Arenacea, caratterizzata da una complessa articolazione stratigrafica che, come si illustrerà più avanti, i più recenti studi hanno consentito di suddividere e rappresentare cartograficamente, in unità tettoniche, membri e litofacies. Gran parte dell'area di studio e di progetto è rappresentata dall'Unità Pietralunga, facente parte della Formazione Marnoso-Arenacea Romagnola qui presente con alcuni dei suoi membri più tipici: Corniolo, Galeata e Collina. Nella zona più orientale dell'area di studio è presente un'altra unità tettonica che costituisce quella strutturalmente più profonda nell'area, denominata Unità Cà Romano e soggiacente all'Unità Pietralunga: è rappresentata dalla Subunità Cà Raffaello, qui rappresentata dal Membro di Civitella.

L'area di studio, come illustrato, ricade nell'ambito dell'Appennino Settentrionale, nel settore di passaggio tra l'Appennino Umbro-Marchigiano e quello Tosco-Romagnolo. La cartografia geologica classica è rappresentata, per il territorio ricadente nell'area di studio, dai fogli della Carta Geologica d'Italia, in scala 1:100.000, 108 "Mercato Saraceno" e 115 "Città di Castello" (Figura 3-3). Tale cartografia evidenzia un substrato rappresentato dall'unità flyschoidale definita genericamente Marnoso-Arenacea (Elveziano-Langhiano Superiore) o Marnoso-Arenacea "Romagnola" (Tortoniano-Langhiano) limitatamente al Foglio 108; in quest'ultimo foglio il settore prevalente, ad est della Marnoso-Arenacea Romagnola, è caratterizzato dalla facies umbro-marchigiana della stessa unità, prevalentemente marnosa, del Tortoniano-Serravalliano. È evidente, tuttavia, osservando lo stralcio di cartografia in Figura 3-3, che questa suddivisione è il risultato di rilievi eseguiti da scuole e rilevatori diversi, come risulta dalle informazioni relative ai due fogli. Rimane, invece, il dato di base, rappresentato dall'ossatura dei rilievi dell'area di studio, costituita dall'unità torbiditica Marnoso-Arenacea o Marnoso-Arenacea Romagnola, attribuita al Miocene Medio e complessivamente compresa tra il Langhiano e il Tortoniano. Altro elemento che spicca dal punto di vista litostratigrafico è la presenza di depositi alluvionali terrazzati di età pleistocenica e olocenica di diverso ordine, che colmano le valli del Fiume Metauro e del suo affluente di destra Torrente S. Antonio e, infine, alcuni lembi di detriti di falda e frana olocenici posti sui versanti opposti delle valli suddette, oltre ad alcuni piccoli apparati di conoidi alluvionali allo sbocco di brevi corsi d'acqua solcanti i medesimi versanti. L'elemento tettonico dominante è la presenza di uno stile a faglie inverse con vergenza a ENE che evolvono verso est in sovrascorrimenti con associati rovesciamenti sul fronte.

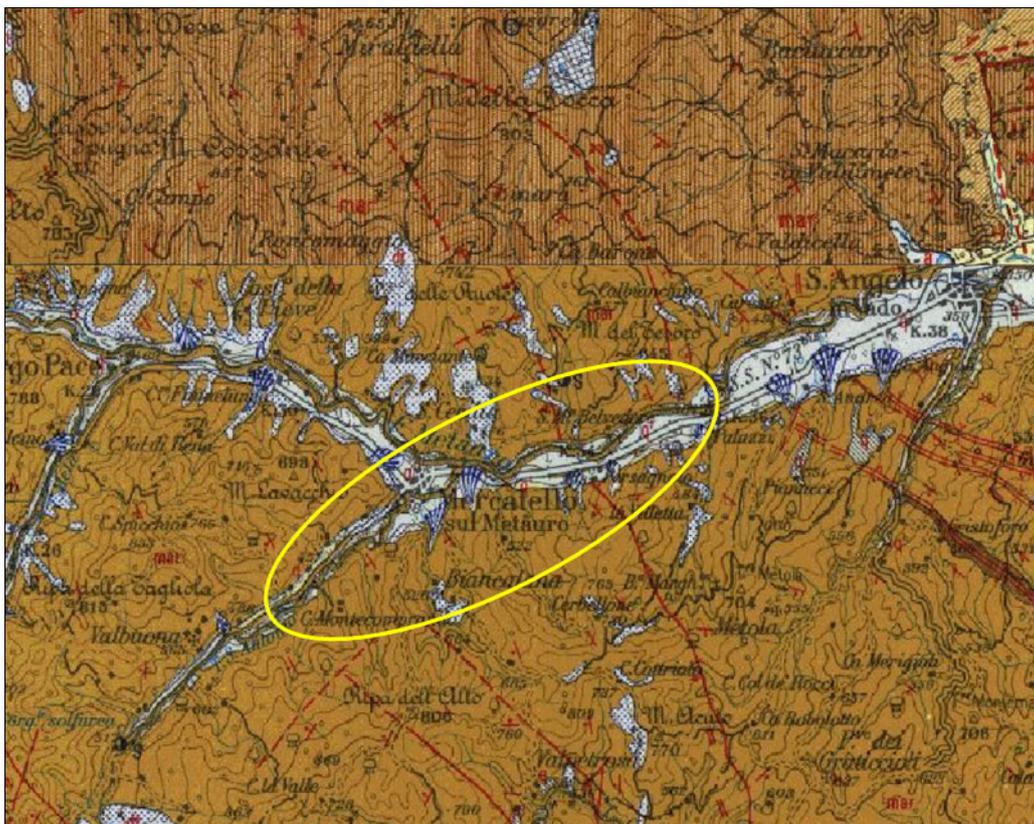


Figura 3-3 Stralci della Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000, Fogli 108 "Mercato Saraceno" e 115 "Città di Castello". Nell'ellisse in giallo è indicata l'area di studio.

In epoca più recente sono stati pubblicati i fogli in scala 1:50.000 della Carta Geologica d'Italia nell'ambito del progetto CARG: l'area di studio è compresa tra i Fogli 278 "Pieve Santo Stefano" e 279 "Urbino" (Figura 3-4). L'unità della Marnoso-Arenacea, con il progredire della ricerca, è stata suddivisa in diverse unità, differenziate per età e per caratteristiche sedimentologiche e stratigrafiche. In primo luogo è stata uniformata la denominazione dell'unità in Formazione Marnoso-Arenacea Romagnola appartenente all'Unità Tettonica di Pietralunga, nell'area ricadente nel Foglio 278, e alle Unità di Monte Vicino e di Borgo Pace nell'area ricadente nel Foglio 279. La formazione è stata distinta da W ad E in diverse sottounità o membri: membro di Corniolo (FMA2), membro di Galeata (FMA4), membro di Collina (FMA5), membro di Civitella (FMA9). L'età di questi membri è compresa tra il Langhiano Superiore ed il Tortoniano basale (Figura 3-5). I rapporti stratigrafici tra questi indicano l'unità basale FMA2, su cui si sovrappongono FMA4 e FMA5, in parziale eteropia. Il membro di Civitella (FMA9), sedimentatosi più ad oriente, è sormontato tettonicamente dai precedenti membri. Dal punto di vista cronostatigrafico la sequenza ricade nel Langhiano Superiore - Serravalliano Inferiore, per quanto riguarda il membro di Corniolo (FMA2), nel Langhiano Superiore - Serravalliano Superiore, per i membri di Galeata (FMA4) e Collina (FMA5); il membro di Civitella (FMA9) ricade nel Serravalliano p.p. - Tortoniano Inferiore.

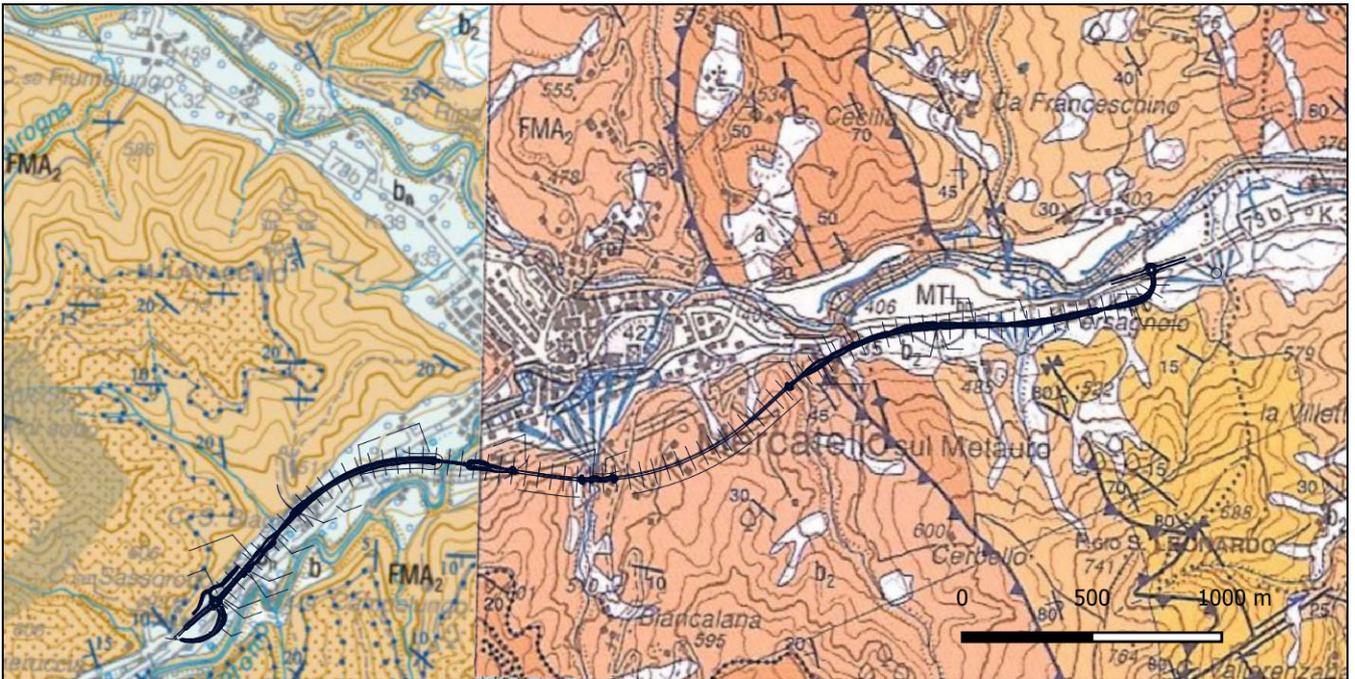


Figura 3-4 Stralcio della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000, Fogli 278 "Pieve Santo Stefano" e 279 "Urbino", con indicazione del tracciato

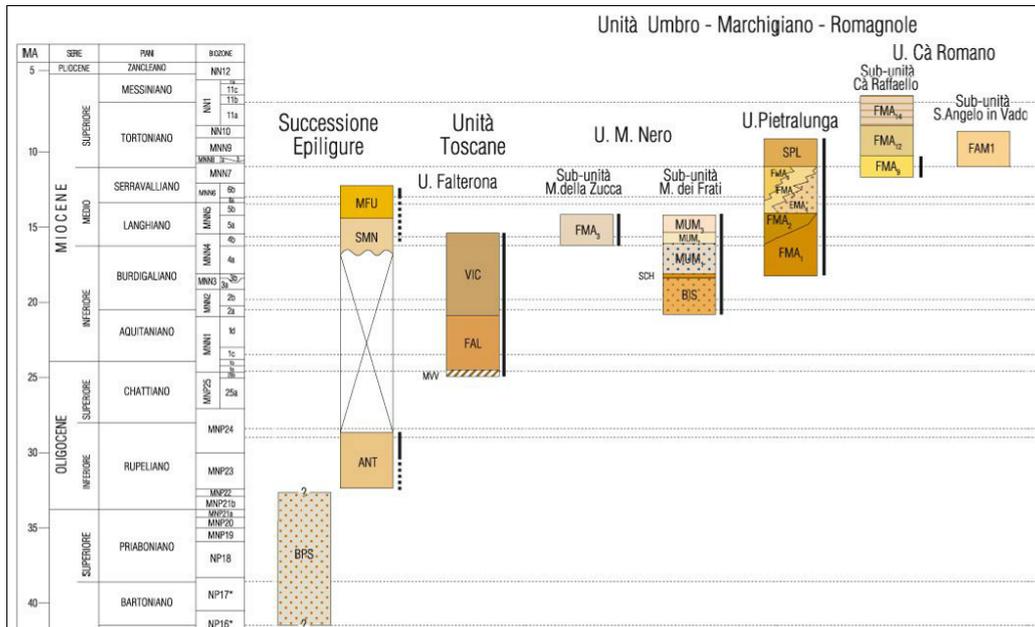


Figura 3-5 Stralcio dello schema cronostatigrafico del Foglio 278 "Pieve Santo Stefano" della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000.

La cronologia delle deformazioni riportata nei documenti geologici ufficiali si basa soprattutto sull'età dei membri e delle litofacies della Marnoso-Arenacea Romagnola. L'età delle unità coinvolte negli accavallamenti varia dall'interno, cioè da SW, verso l'esterno, verso NE, e va dal Miocene Medio in poi. Questa graduale variazione cronologica permette di ipotizzare una migrazione dell'avanfossa appenninica verso l'avampaese, con le unità occidentali che si sovrappongono tettonicamente a quelle poste ad oriente.

PROGETTAZIONE ATI:

Nel Tortoniano la sedimentazione torbiditica si sposta più a est, dove si sviluppa il bacino della Formazione Marnoso-Arenacea Marchigiana (FAM) (Figura 3-5): si tratta di un'avanfossa complessa, controllata dai processi di thrusting che coinvolgono probabilmente anche il substrato carbonatico. Nelle zone più esterne prosegue, nel Pliocene Inferiore, l'attività compressiva: in questa fase si ha la migrazione verso l'esterno dello scollamento profondo che ripiega le strutture della fase intramessiniana e quindi anche substrato e coltri liguri. L'emersione dell'area avviene tra la fine del Messiniano e la parte terminale del Pliocene Inferiore, dalle zone interne verso quelle esterne. Nel corso del Pleistocene si organizza la rete idrografica e vengono depositi sedimenti fluviali entro le vallate. Nel corso dell'Olocene si verifica la riescavazione dei depositi alluvionali pleistocenici e olocenici e l'approfondimento degli alvei fluviali e torrentizi entro le formazioni del substrato, per un processo di generale sollevamento dell'area; è in questa fase che il ringiovanimento dei versanti determina l'attivazione dei processi erosivi, dell'accumulo di depositi colluviali all'interno delle depressioni e al piede dei pendii e, localmente, l'attivazione dei fenomeni franosi.

3.3. SUCCESSIONE STRATIGRAFICA DI RIFERIMENTO

Di seguito viene descritta la successione stratigrafica affiorante nell'area interessata dal progetto stradale, con le unità elencate in ordine di età decrescente, partendo dal termine più antico per arrivare al più recente. La terminologia utilizzata per le unità del substrato torbiditico corrisponde a quella più recente, che fa riferimento alla cartografia geologica ufficiale in scala 1:50.000 di progetto CARG, riportata nei due fogli in cui ricade l'area, cioè il 278 e il 279: la formazione è quella della Marnoso-Arenacea Romagnola (FMA) suddivisa, a sua volta, in sottunità o membri. Per quanto riguarda le formazioni pleistoceniche ed oloceniche, date le sigle differenti adottate nei due fogli suddetti per unità di simile età ed ambiente di formazione, sono state adottate nuove sigle in luogo di quelle riportate nei fogli geologici della cartografia ufficiale.

3.3.1. FORMAZIONE MARNOSO-ARENACEA ROMAGNOLA

3.3.1.1. Membro di Corniolo (FMA2)

L'unità affiora ampiamente in tutto il settore occidentale e centrale dell'area rilevata, dall'origine fino oltre l'abitato di Mercatello sul Metauro, rappresentando arealmente la formazione maggiormente affiorante nell'area di studio, in una fascia delimitata ad oriente dal "sovrascorrimento di Mercatello", struttura di importanza regionale. Nell'area non ne affiora la base, mentre se ne osserva l'affioramento del tetto in numerose zone ad ovest di Mercatello sul Metauro. In virtù del livello stratigrafico affiorante e dell'assetto giaciturale degli strati, costantemente immergenti verso SW con inclinazioni quasi ovunque di pochi gradi sopra l'orizzonte ad ovest del sovrascorrimento (struttura monoclinale piuttosto regolare), il contatto con il soprastante Membro di Galeata (FMA4) si segue con notevole continuità lungo le curve di livello ed è gradualmente posto a quote decrescenti da est verso ovest, tanto che all'estremità occidentale dell'area di studio si rinviene entro l'alveo del Torrente S. Antonio nei pressi della località Casa Colcello. Come evidenziato anche successivamente, il passaggio al membro soprastante è ancora più evidente in quanto marcato dallo strato guida "Contessa", potente livello calcarenitico affiorante lungo numerosi tratti, posto alla base del Membro di Galeata, di elevato valore sia come livello "reperè" nella successione torbiditica, sia come marker morfologico in quanto su esso si imposta una costante scarpata morfologica. Il Membro di Corniolo è rappresentato da torbiditi pelitico arenacee con rapporto A/P = 1/3 - 1/4 che può giungere a 1/6 nei settori orientali. Le arenite sono prevalentemente arenarie, in strati prevalentemente molto sottili (centimetrici) e subordinatamente sottili e medi (da alcuni cm a 10-40 cm), con alcuni strati molto spessi (circa 80 cm), a grana fine e di colore grigiastro. Alla base degli strati arenacei sono ben visibili impronte di corrente tipo flute cast che indicano provenienze

PROGETTAZIONE ATI:

da NW, cioè di tipo alpino, mentre quelle misurate sulle arenite ibride hanno direzioni del flusso da E-SE. La porzione pelitica, prevalente, è costituita da marne di colore grigiastro, variamente argillose, sottilmente stratificate, con fratturazione prevalente da concoide ad aciculare. Le marne si presentano prevalentemente in banchi spessi anche molti metri. L'unità è interessata da una coltre di alterazione di colore giallastro spessa fino ad alcuni metri, che si manifesta sia con il locale scompaginamento degli strati che con un processo di degradazione fisica e formazione di patine o bande di ossidazione ocraceo-rossastre, particolarmente sviluppate lungo le superfici di fratturazione. In Figura 3-6 si può apprezzare uno spesso affioramento della parte sommitale del membro, presente lungo una scarpata di erosione a ridosso del Torrente S. Antonio, il cui letto è caratterizzato dall'affioramento del bedrock (Figura 3-7), a sottolineare l'azione erosiva del corso d'acqua. La stratigrafia del sondaggio S2 (2021) eseguito nella piana alluvionale del Torrente S. Antonio, in corrispondenza dell'omonimo ponte in progetto, dove si evince l'esiguo spessore della coltre alluvionale e il passaggio a circa 3 metri tra alluvione e bedrock, costituito da arenarie marnose con grado di fratturazione molto basso. Le microfaune presenti indicano un'età compresa tra il Langhiano p.p. e il Langhiano Superiore.



Figura 3-6 Affioramento della parte sommitale del Membro di Corniolo, spesso circa 30 m, in destra idrografico del Torrente S. Antonio, presso l'origine dei tracciati stradali in località Casa Tabina; sono evidenti gli strati e banchi arenacei, in rilievo sulla superficie della scarpata in quanto più resistenti all'erosione delle peliti circostanti.

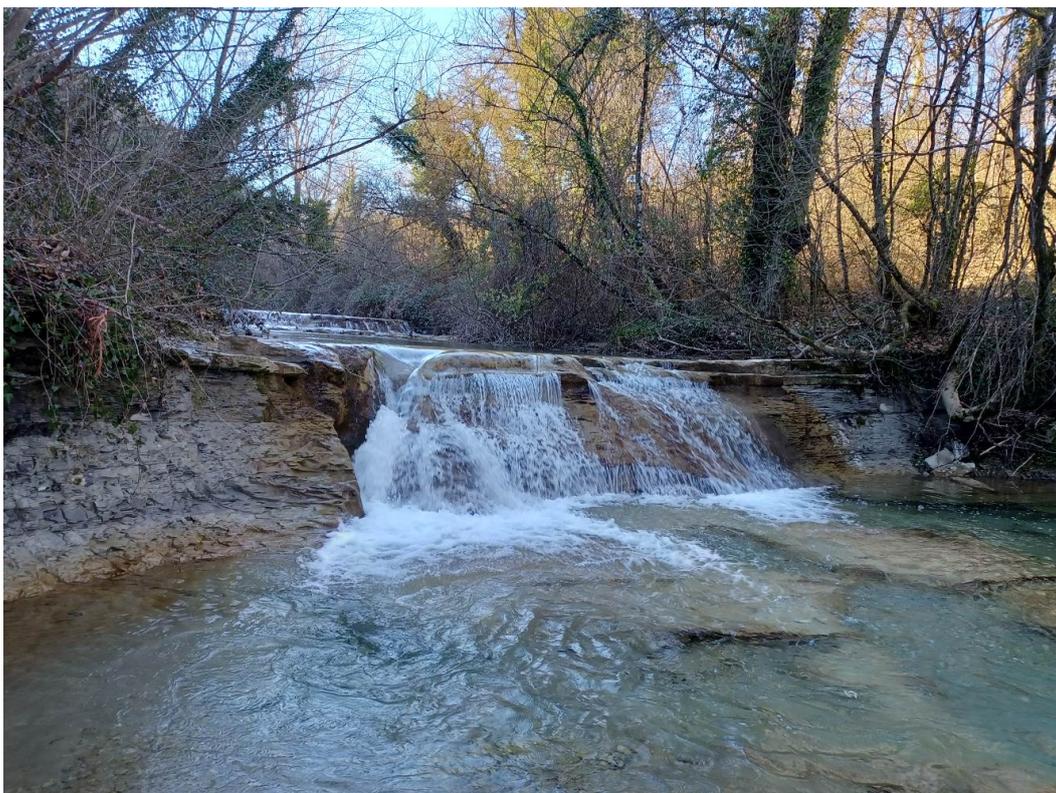


Figura 3-7 Letto del Torrente S. Antonio costituito dal Membro di Corniolo, ad indicare l'azione erosiva del corso d'acqua.

L'unità, è quella maggiormente rappresentata negli elaborati di progetto ed è intercettata dall'asse stradale dalle due gallerie, rispettivamente tra le progressive 1+350 e 1+650 circa e tra 1+750 e 2+550 circa, oltre che, indirettamente, con le fondazioni relative alle opere d'arte: in quest'ultimo caso la principale di queste è rappresentata dal ponte sul Torrente S. Antonio, tra le progressive 1+050 e 1+150 circa.

La formazione è stata caratterizzata dal punto di vista geomeccanico-strutturale attraverso tre stazioni di misura eseguite in campo durante i rilievi dell'attuale fase progettuale, le tre stazioni di misura, SG2, SG3 (Figura 3-8) e SG4, sono state eseguite rispettivamente in corrispondenza del corpo della seconda galleria, all'imbocco est della prima galleria e in un'area che per caratteristiche geosturali è assimilabile all'imbocco ovest della prima galleria.

PROGETTAZIONE ATI:



Figura 3-8 Membro del Corniolo, nell'area dell'imbocco est della Galleria 1

3.3.1.2. Membro di Galeata (FMA4)

L'unità affiora al tetto del Membro di Corniolo nel settore occidentale dell'area rilevata, costituendo in molti casi il top dei rilievi. Ad oriente del "sovrascorrimento di Mercatello" il Membro di Galeata è posto al muro del sovrascorrimento, sormontato dal Membro di Corniolo su entrambe le rive del Fiume Metauro. Nell'area ne affiora la base lungo molti tratti ad ovest del sovrascorrimento, ed è possibile seguirla con notevole continuità in quanto coincidente con lo strato guida "Contessa", potente livello calcarenitico, in parte descritto nel precedente paragrafo; ad est del sovrascorrimento affiora la parte superiore del membro poiché si osserva il passaggio al soprastante Membro di Collina (FMA5) in destra idrografica del Fiume Metauro. Il Membro di Galeata è rappresentato da torbiditi arenaceo-pelitici con rapporto A/P compreso fra 1/4 a 1/5. Le arenarie, con paleocorrenti da NW, si presentano in strati da sottili (fino a 10-15 cm) a molto spessi (rari) di colore grigiastro; la grana è sempre fine. La frazione pelitica è costituita da marnosiltiti fini grigie, a volte marne biancastre compatte con spessore anche di 2 metri; le peliti sono variamente argillose, sottilmente stratificate, con fratturazione prevalente da concoide ad aciculare. Sono abbondanti gli apporti calcarenitici (colombine) con provenienze da SE: si tratta di calcareniti fini di colore grigio chiaro con spessore massimo di circa 1 m. Il Membro di Galeata contiene lo strato Contessa che, nell'area di studio, marca il limite con la sottostante litofacies di Corniolo (FMA2). Nell'area di studio lo strato affiora estesamente e presenta spessori massimi di circa 3 m (Figura 3-9). Si tratta di una calcarenite con evidenti paleocorrenti da SE; al tetto nell'area rilevata è quasi sempre visibile una "coda" di marnosiltiti fini grigie che può raggiungere anche gli 8 metri di spessore.



Figura 3-9 Affioramento dello Strato “Contessa”, base del Membro di Galeata, nei pressi della località Casa Tabina, in prossimità dell’origine del tracciato. Lo spessore misurato è di circa 3 m.



Figura 3-10 A sinistra, area del sovrascorrimento dove affiora la parte superiore del Membro di Galeata. A destra, area del sovrascorrimento dettaglio strie

PROGETTAZIONE ATI:



Figura 3-11 Bancata di marne grige, spessa circa 8 m, giacente sullo Strato “Contessa”, base del Membro di Galeata, nei pressi della località Casa Tabina, in prossimità dell’origine dei tracciati. È evidente in primo piano il tetto dello strato Contessa (foto da PFTE)

Questa unità è interessata da una coltre di alterazione, di colore giallastro, che raggiunge spessori di alcuni metri, rappresentata localmente da una disarticolazione strutturale dell’ammasso, con locale sostituzione della facies lapidea con una coltre limosa e formazione di patine o bande di ossidazione ocraceo-rossastre, particolarmente sviluppate lungo le superfici di fratturazione. L’ambiente deposizionale è di piana bacinale. Le microfaune presenti indicano un’età compresa tra il Langhiano superiore p.p. e il passaggio Serravalliano sommitale-Tortoniano basale.

L’unità non è intercettata in nessun punto ad occidente del sovrascorrimento, poiché affiora ovunque a quote superiori rispetto al tracciato; interessa il progetto nella fascia immediatamente ad E del sovrascorrimento tra le progr. 2+700-3+150 circa dove il Membro di Galeata soggiace alla coltre di depositi di versante e colluviali (dvc).

3.3.1.3. Membro di Collina (FMA5)

L’unità affiora al tetto del Membro di Galeata, come si osserva ad E del “sovrascorrimento di Mercatello”, nei pressi della località Casa Valdivatica, in destra Metauro. In sinistra il contatto tra le due unità risulta, invece, di origine tettonica, in corrispondenza del secondo sovrascorrimento, anch’esso d’importanza regionale, nei pressi della località Case Nuove, dove il Membro di Collina è posto al muro del Membro di Galeata. In corrispondenza di Casa Valdivatica l’unità si rovescia sul fianco orientale dell’anticlinale, avvicinandosi al secondo sovrascorrimento. L’unità presenta un rapporto A/P medio di 1/10, ed è costituita complessivamente da un’alternanza di peliti dominanti e areniti subordinate, le quali sono prevalentemente arenarie, talora calcareniti e areniti ibride. Gli strati arenacei sono da molto sottili a sottili (10 cm) fino a spessi (50-110 cm). La porzione pelitica è caratterizzata da marne grigie e da livelli calcilutitici, che presentano una fratturazione variabile, da aciculare a concoide. In corrispondenza di Casa Valdivatica si ha un’estesa esposizione del Membro di Collina in posizione rovesciata, immediatamente a monte del tratto terminale del tracciato. Il Membro di Collina è particolarmente esposto lungo il corso d’acqua del Metauro,

PROGETTAZIONE ATI:

denotando un'azione erosiva del fiume, dove genera scarpate, e su di una di queste in corrispondenza dell'area terminale del progetto è stata eseguita una stazione geostrutturale-geomeccanica. Le paleocorrenti indicano provenienze da NO per le arenarie e da E-SE per le colombine. L'unità è superficialmente ricoperta da una coltre di alterazione, di colore marrone-giallastro, che giunge a spessori di alcuni metri, caratterizzata da una locale disarticolazione strutturale dell'ammasso, con formazione di una coltre limoso-argillosa e di bande di ossidazione ocraceo-rossastre, particolarmente sviluppate lungo le superfici di fratturazione. L'ambiente deposizionale è di piana bacinale. In base alla microfauna presente l'unità è assegnata al Langhiano Superiore p.p. e al Serravalliano Superiore.

Il Membro di Collina è interessato dal tracciato, presso la sua parte terminale (progr. 3+700-4+036 circa), dove è ricoperto dalla coltre dei depositi di versante e colluviali.



Figura 3-12 Scarpata in sinistra idrografica del Fiume Metauro costituita dal Membro di Galeata

3.3.1.4. Membro di Civitella (FMA9)

Questa unità si riscontra nell'area di studio solo in destra Metauro, al tetto del Membro di Collina: il contatto stratigrafico si osserva presso il limite orientale dell'area studiata, in località Casa Fosso Porcai. L'altro contatto, posto poco ad occidente del precedente, nei pressi della località Persagnolo, è invece di carattere tettonico ed è rappresentato dal secondo sovrascorrimento partendo da Mercatello verso oriente: il Membro di Civitella è posto al muro del Membro di Collina e presso il contatto è in posizione rovesciata in corrispondenza del nucleo di una struttura sinclinalica. Nell'area affiora la porzione inferiore dell'unità che presenta in generale un valore variabile del rapporto A/P da 1:2 a 1:3. Le arenarie sono gradate, di colore avana-grigiastro, da medie a fini, con spessori di 5-10 cm rilevati negli affioramenti. Le paleocorrenti misurate nelle arenarie indicano sempre provenienze da NO. Le peliti sono rappresentate da marne di colore grigio, prevalenti negli affioramenti rilevati, e presentano una fratturazione prevalentemente di tipo terroso (Fig. 6.6). Anche questa unità è superficialmente ricoperta da una coltre di alterazione, di colore giallastro, spessa fino ad alcuni metri, caratterizzata localmente da uno scompaginamento della struttura dell'ammasso, con formazione di una coltre limosa e di bande di ossidazione ocraceo-rossastre, particolarmente sviluppate lungo le superfici di fratturazione.

PROGETTAZIONE ATI:



Figura 3-13 Sequenza di peliti dominanti e strati arenace (spessore medio 5 cm), della potenza complessiva di 5 m, presso la località C. Valdivatica, a monte del tratto terminale del tracciato

Con questa unità si chiude la sequenza stratigrafico-deposizionale della Formazione Marnoso-Arenacea Romagnola (FMA). I foraminiferi bentonici indicano una minore profondità del bacino, che passa così da ipo o mesobatale a epibatale. Il contenuto microfaunistico indica per l'unità un'età compresa tra il Serravalliano e il Tortoniano Inferiore p.p..

Il Membro di Civitella è interessato dal tracciato presso la sua parte terminale (progr. 3+450-3+750 circa), dove è ricoperto dalla coltre dei depositi di versante e colluviali: in questo tratto potrebbe essere interessato solo da opere minori.

3.3.2. DEPOSITI CONTINENTALI QUATERNARI

3.3.2.1. Sintema di Matelica – depositi alluvionali terrazzati pleistocenici (ama)

L'unità è presente con estesi affioramenti nelle valli del Torrente S. Antonio e del Fiume Metauro e in alcune vallate affluenti. Si tratta di sedimenti alluvionali riferibili ai terrazzi del 3° ordine tradizionali. Costituiscono superfici pianeggianti, ampie nelle valli principali, strette ed allungate nelle valli secondarie. Attualmente si presentano in erosione, con il substrato flyschoidale affiorante negli alvei attuali del Torrente S. Antonio e del Fiume Metauro: ciò significa che in epoche recenti l'area ha subito un rapido sollevamento che ha portato alla reincisione dei sedimenti fluviali e all'erosione del substrato. L'unità è rappresentata da sedimenti prevalentemente ghiaiosi con intercalazioni di lenti limoso-sabbiose o sabbioso-ghiaiose. In corrispondenza dei conoidi alluvionali nei sedimenti in questione si riscontrano passaggi di lenti detritiche costituite da pezzame eterometrico di arenarie e marne.

Il tracciato attraversa questa unità nella piana del Torrente S. Antonio dalla prog. 0+000 alla 1+250 con due piccole interruzioni, una in corrispondenza dell'attraversamento del corso d'acqua, dove in corrispondenza dell'alveo affiora il Membro di Corniolo, e una in corrispondenza della prog. 0+550 dove il tracciato dalla piana devia leggermente sulle colline in sinistra idrografica del corso, dove ancora una volta affiora il Membro di Corniolo. Il tracciato riattraversa il Sintema di Matelica in

PROGETTAZIONE ATI:

corrispondenza dell'imbocco est della galleria 1 per un tratto di 20 metri alla prog. 1+650, e nella parte terminale del tracciato, in corrispondenza dell'innesto dell'attuale statale alla prog. 4+068, per circa 30 metri, poiché scende nella piana del Metauro.

3.3.2.2. Sintema del musone – depositi alluvionali terrazzati olocenici (amu)

Questa unità è presente solo in alcune piccole aree, in posizione terrazzata, a ridosso del Torrente S. Antonio e del Fiume Metauro, ed è riconducibile ai terrazzi del 4° ordine della letteratura tradizionale. In alcune aree questi sedimenti raccordano quelli del Sintema di Matelica (unità ama) con il fondovalle dei due corsi d'acqua presenti. I depositi in questione sono rappresentati da ghiaie talora grossolane, intercalate a livelli e lenti sabbiosi, sabbio-ghiaiosi e argillo-sabbiosi. Gli spessori sono modesti.

L'unità non viene interessata in nessun tratto dal tracciato in progetto.

3.3.2.3. Depositi di versante e colluviali (dvc)

I depositi in oggetto si riscontrano in tutta l'area di studio e lungo tutti i versanti. Sono presenti entro le depressioni laterali alle due principali valli fluviali (Torrente S. Antonio e F. Metauro) e al piede di alcuni tratti di versante. Questi depositi colmano le depressioni e raccordano i versanti più acclivi con la pianura, determinando un addolcimento della morfologia dell'area. La loro genesi è legata, per lo più, al continuo apporto di detriti provenienti dallo smantellamento fisico dei versanti, in cui l'agente è rappresentato dalla gravità, con il contributo di un modesto trasporto ad opera delle acque di ruscellamento. La composizione di tali depositi è data da uno scheletro di clasti eterometrici a spigoli vivi di arenarie, calcareniti e marne, in abbondante matrice costituita da variabili percentuali di sabbia, limo e argilla. Gli spessori sono estremamente variabili da zona a zona.

I depositi di versante e colluviali sono attraversati dal tracciato in progetto tra le prog. 1+250 e 1+350 circa, in corrispondenza dell'imbocco ovest della galleria 1, nell'area di raccordo tra le due gallerie tra le prog. 1+650 e 1+750 circa ed infine, nell'area di raccordo che si sviluppa in destra idrografica del F. Metauro tra la piana, dello stesso corso, e le colline, tra le prog. 2+600 e 4+020, con una piccola interruzione a cavallo della prog. 2+950 circa, dove il tracciato attraversa un corpo di frana.

3.3.2.4. Depositi di frana (fr)

I depositi di frana sono presenti in corrispondenza di numerosi versanti, soprattutto nei bacini affluenti dei due principali corsi d'acqua. Si tratta quasi integralmente di corpi di frana senza indizi di evoluzione, classificati come quiescenti, risultato di movimenti avvenuti nel passato e i cui segni superficiali hanno subito processi di colmamento e di rimodellamento, quindi attualmente si presentano poco evidenti. Corpi di frana attivi, quindi con segni ancora molto ben evidenti, sono solo alcuni piccoli fenomeni, dovuti in parte alla presenza della viabilità secondaria e alla carente regimazione delle acque di ruscellamento. La composizione di tali depositi è rappresentata da uno scheletro di clasti eterometrici prevalentemente a spigoli vivi di arenarie, calcareniti e marne, in abbondante matrice costituita da variabili percentuali di sabbia, limo e argilla. Gli spessori sono variabili da zona a zona.

Il tracciato attraversa un corpo di frana tra le prog. 2+900 e 3+100 circa, in un'area al piede di un fenomeno classificato come complesso.

3.4. SCHEMA IDROGEOLOGICO

Il reticolo idrografico dell'area di interesse è dominato dalla presenza di un'asta fluviale (Fiume Metauro), nel tratto montano del suo corso, e di un suo affluente di destra (Torrente S. Antonio). I due corsi d'acqua, che mostrano un prevalente regime torrentizio, hanno inciso le alluvioni

PROGETTAZIONE ATI:

terrazzate pleistoceniche ed oloceniche ed ora incidono anche il substrato marnoso arenaceo. I versanti sono attraversati da fossi orientati in prevalenza in direzione N-S che, a loro volta, hanno inciso le proprie alluvioni pleistoceniche e ora incidono il substrato o i detriti di falda. Questi elementi indicano una recente ed attuale fase erosiva generalizzata del reticolo idrografico, a causa di un rapido sollevamento del territorio oggetto di studio. Il corso d'acqua principale, attraversato dal tracciato di progetto, è il Torrente S. Antonio, nella parte occidentale dell'area in studio. Procedendo da ovest verso est, sono numerosi i corsi d'acqua attraversati, tra i quali i principali sono: il fosso che confluisce in destra del Torrente S. Antonio nella zona sud di Mercatello denominata Colombaro, il Fosso Romito che confluisce in destra del Fiume Metauro nei pressi della zona artigianale di località Bolciano.

Dal punto di vista idrogeologico, nell'area in esame si individuano più complessi a comportamento omogeneo, caratterizzati da condizioni e gradi di permeabilità distinte.

Il substrato può essere considerato omogeneo dal punto di vista idrogeologico, quindi è rappresentato dall'insieme dei membri che costituiscono la Formazione Marnoso-Arenacea Romagnola. Nell'insieme è rappresentato da alternanze di strati a consistenza lapidea di natura marnosa, prevalenti, e di natura arenacea, subordinati; la permeabilità, di tipo secondario, per fratturazione, è media nella coltre di alterazione, da bassa a nulla in profondità. In questa unità idrogeologica possono attivarsi piccole falde acquifere sospese, nelle coltri di alterazione, oppure localizzate circolazioni idriche, anche in pressione, in profondità, all'interno di banchi arenacei o calcarenitici fessurati.

Un altro complesso idrogeologico è rappresentato dai depositi alluvionali terrazzati, costituiti da sedimenti sciolti di granulometria variabile da ghiaia ad argilla, in posizione sopraelevata rispetto all'alveo dei corsi d'acqua. La permeabilità è di tipo primario per porosità ed è di grado medio-alto. In questa unità è presente una falda acquifera di tipo freatico di significativa potenzialità idraulica.

Il terzo complesso idrogeologico è costituito dai depositi colluviali e dai corpi di frana, la cui granulometria è complessivamente fine, di tipo limo-argillo-sabbioso, con variabile presenza di uno scheletro clastico di arenarie e marne. La permeabilità è di tipo primario per porosità ed ha un grado medio-basso. In tale complesso possono essere presenti piccole falde di variabile potenzialità idraulica che spesso alimentano la falda acquifera di fondovalle.

3.4.1. COMPLESSI IDROGEOLOGICI

Nell'elaborato specifico (T00GE01GEOCI) sono stati distinti tre differenti complessi idrogeologici classificati con il metodo AFTES.

| MOLTO ALTA - ALTA $K > 10^{-4}$ m/s | ALTA - MEDIA 10^{-4} m/s > $K > 10^{-6}$ m/s | MEDIA - BASSA 10^{-6} m/s > $K > 10^{-8}$ m/s | BASSA - MOLTO BASSA $K > 10^{-9}$ m/s | COMPLESSO IDROGEOLOGICO |
|--|---|---|--|---|
| |  | | | COMPLESSO DEI DEPOSITI ALLUVIONALI ATTUALI, RECENTI E ANTICHI |
| | |  | | COMPLESSO DEI DEPOSITI ELUVIO-COLLUVIALI, DEI DETRITI DI FALDA E DEI FENOMENI GRAVITATIVI |
| | |  | | COMPLESSO DEI FLYSCH DELLA SUCCESSIONE MARNOSO-ARENACEA ROMAGNOLA |

Figura 3-14 Legenda complessi idrogeologici

3.4.1.1. Complesso dei depositi alluvionali attuali, recenti e antichi

Il complesso comprende le formazioni geologiche dei depositi alluvionali attuali e recenti (Sintema del Musone) e pleistocenici (Sintema di Metalica) dei fondivalle e dei terrazzi alluvionali. Il complesso comprende depositi costituiti da ciottoli, ghiaie, sabbie, limi ed argille in proporzioni variabili, organizzata in depositi a geometria lenticolare, con frequenti eteropie laterali e verticali di facies. La permeabilità è di tipo primario per porosità ed è di grado medio-alto. In questa unità è presente una falda acquifera di tipo freatico di significativa potenzialità idraulica.

3.4.1.2. Complesso dei depositi eluvio-colluviali, dei detriti di falda e dei fenomeni gravitativi

Il complesso è rappresentato da terreni prevalentemente sciolti costituiti da uno scheletro di dimensioni molto variabili, da ciottoli millimetrici a blocchi, e da una matrice quasi ovunque prevalente di natura limoso-sabbiosa localmente argillosa. Questi depositi sono localizzabili lungo il bordo delle dorsali, nelle zone di raccordo con le piane alluvionali, e nelle aree affette da instabilità gravitativa recente e attuale. La permeabilità è di tipo primario per porosità ed ha un grado medio-basso. In tale complesso possono essere presenti piccole falde di variabile potenzialità idraulica che spesso alimentano la falda acquifera di fondovalle.

3.4.1.3. Complesso dei flysch della successione marnoso-arenacea Romagnola

Il complesso comprende i depositi ascrivibili alla formazione Marnoso-Arenacea Romagnola. La presenza in queste successioni di consistenti sequenze torbiditiche, costituite da potenti banchi di arenarie con intercalazioni marnose-argillose permette l'instaurarsi di una circolazione idrica sotterranea in un sistema acquifero di tipo compartimentato, sia per la presenza delle intercalazioni marnose-argillose, sia per il ruolo svolto dai contatti tettonici, che interrompono la continuità laterale dei livelli acquiferi. Quando lo sviluppo areale delle sequenze permeabili è rilevante può risultare significativa in queste successioni l'aliquota di infiltrazione efficace, che sostiene il flusso di base dei corsi d'acqua drenanti tali strutture, e permette l'instaurarsi di una circolazione idrica sotterranea che può risultare importante. La permeabilità, di tipo secondario, per fratturazione, è media nella coltre di alterazione, da bassa a nulla in profondità. In questa unità idrogeologica possono attivarsi piccole falde acquifere sospese, nelle coltri di alterazione, oppure localizzate circolazioni idriche, anche in pressione, in profondità, all'interno di banchi arenacei o calcarenitici fessurati.

3.4.2. RICOSTRUZIONE PIEZOMETRICA

Dall'esame dei dati dei monitoraggi piezometrici eseguiti nell'anno 2022 è stato possibile ricostruire l'oscillazione della falda tra i mesi di aprile e settembre, ipotizzando in questo intervallo due superfici piezometriche differenti (T00GE01GEOFG), si è scelto nell'attuale fase progettuale di considerare esclusivamente i dati piezometrici dell'ultima campagna geognostica. Per la ricostruzione delle curve piezometriche sono stati utilizzati i dati del monitoraggio del mese di aprile, che portano ad avere una falda più superficiale e quindi più cautelativa ai fini progettuali.

I dati dei monitoraggi sono relativi al piezometro S11, attrezzato con piezometro a tubo aperto, la finestra di monitoraggio considerata va dal 6 aprile al 23 settembre, si può notare (Figura 3-15) come la profondità della superficie piezometrica tenda ad aumentare; va tenuto conto che l'estate del 2022 è stata particolarmente secca. Dalle ricostruzioni risulta che il flusso idrico sotterraneo sia parallelo a quello superficiale, in particolare nelle piane parallelo ai due corsi d'acqua e sui versanti ortogonale a questi, confluyente verso le piane.

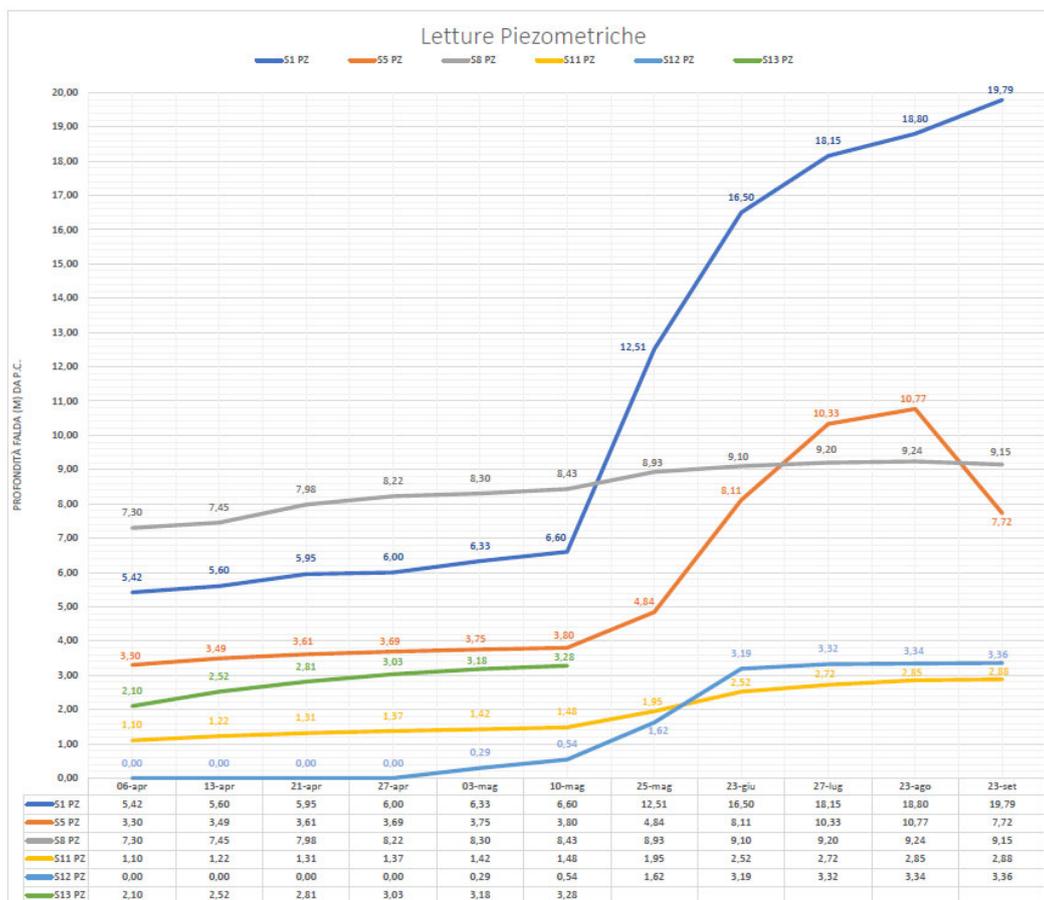


Figura 3-15 Misure piezometro a tubo aperto

I dati di repertorio ed i nuovi dati misurati hanno consentito di caratterizzare la superficie piezometrica e di riportarla sul profilo geologico. Dalle informazioni acquisite si sono, rese evidenti alcune caratteristiche idrogeologiche locali. Nell'ambito dei depositi colluviali della piana del Metauro posti a quote più basse, immediatamente a ridosso della pianura, in particolare presso le zone terminali dell'area rilevata, sulla destra del Fiume Metauro, si è registrata una superficie piezometrica, misurata nel piezometro S11, con oscillazione massima di 3 m nel periodo di riferimento, questa piezometrica si riferisce probabilmente ad un'unica falda idrica o a più falde tra loro connesse e si ritiene che verso valle vada ad alimentare la falda freatica presente nei depositi alluvionali della piana del Metauro.

3.5. SCHEMA GEOMORFOLOGICO

L'area di studio del presente progetto è rappresentata da rilievi collinari, ad acclività variabile da blanda a sostenuta, ricadenti nell'estremo settore nord-orientale dell'Appennino Umbro-Marchigiano. Il territorio è solcato dalla valle del Fiume Metauro e da quella del suo affluente di destra Torrente S. Antonio. L'area con maggior ampiezza del fondovalle è in corrispondenza della confluenza dei suddetti corpi d'acqua, dove sorge l'abitato di Mercatello sul Metauro (Figura 3-16). Il territorio ricade nella parte alta dei bacini imbriferi suddetti, i rilievi presenti ricadenti nell'area rilevata raggiungono la quota di 600 m slm. circa, mentre il fondovalle è compreso tra 460 m e 380 m s.l.m. circa.

Uno degli elementi geomorfologici più evidenti e significativi del territorio esaminato è la presenza di terrazzi fluviali antichi e recenti lungo il Fiume Metauro ed il Torrente S. Antonio. I due corsi d'acqua sono in accentuata fase erosiva: infatti i loro alvei hanno eroso le alluvioni di fondovalle ed ora incidono il substrato marnoso arenaceo (Figura 3-18 e Figura 3-19).

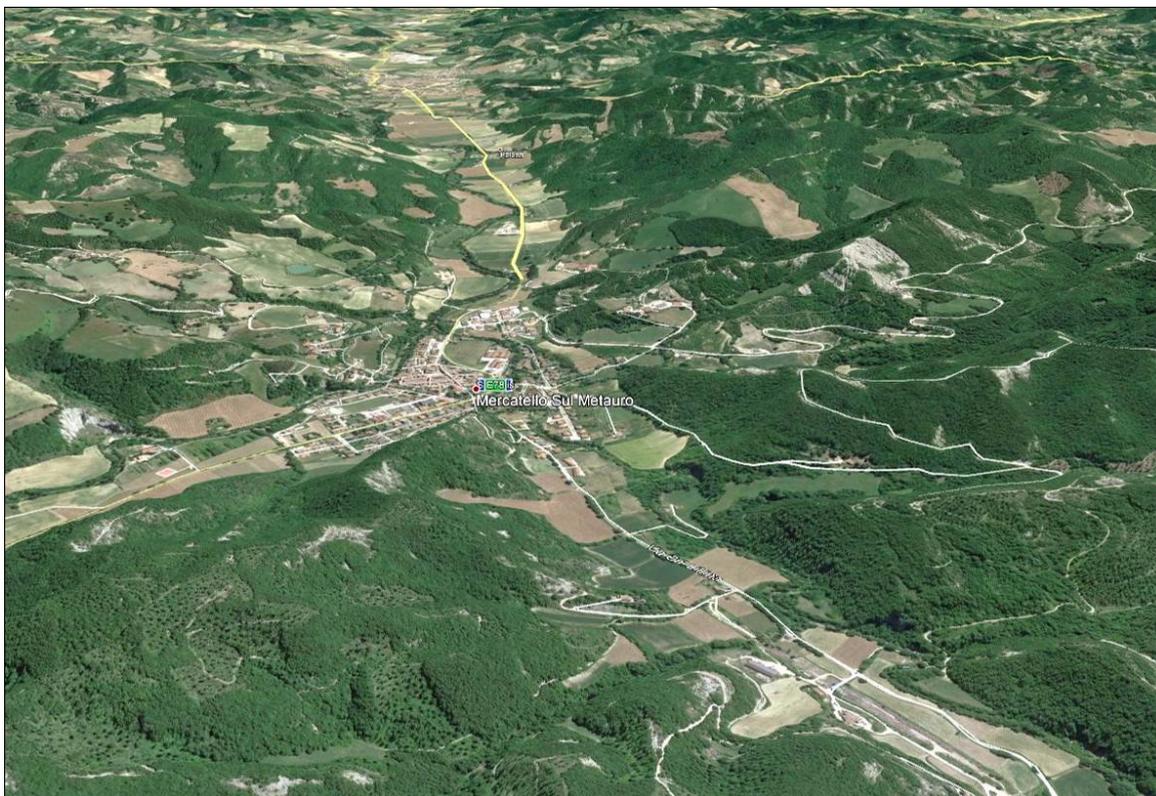


Figura 3-16 Panoramica da W del territorio di studio (Google Earth).

Il fondovalle è pianeggiato e corrisponde alla superficie superiore dei terrazzi di 3° ordine (a minor quota) o di 4° ordine (a quote più elevate). Tra questi ultimi sono compresi lembi di alluvioni terrazzate presenti nelle vallecole laterali in destra del Metauro, solcate da torrenti, pensili una ventina di metri sopra l'alveo principale, e profondamente incisi nei sedimenti delle coperture detritiche e nel substrato. L'individuazione dei terrazzi è stata eseguita attraverso l'utilizzo del modello di elevazione del terreno (DTM) fornito dal Geoportale Nazionale (*Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare - Direzione Generale per la Salvaguardia del Territorio e delle Acque*), ed in particolare attraverso una serie di sezioni ortogonali al corso d'acqua.

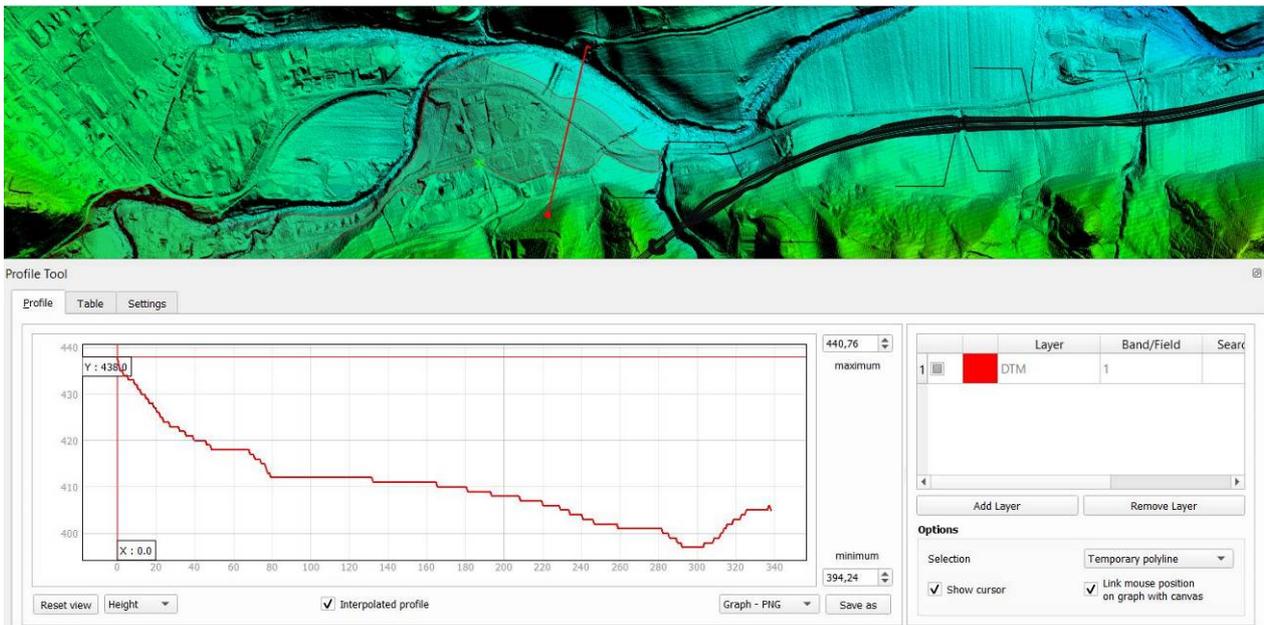


Figura 3-17 Ricostruzione terrazzi alluvionali da sezioni

Le alluvioni sfumano nelle fasce detritiche che ammantano il piede delle pendici dei rilievi che, con la loro elevata pendenza, contrastano e caratterizzano il paesaggio, oppure colmano le depressioni in cui sono incisi i corsi d'acqua minori.

La rete idrografica dei torrenti tributari di destra del Torrente S. Antonio e del Fiume Metauro, incide profondamente i versanti destri dei due corsi d'acqua, attraversati da segmenti dei tracciati, con andamento poco inclinato rispetto alla direzione degli strati marnoso – arenacei. In considerazione di ciò e al fatto che la giacitura è uniforme in termini di immersioni prevalenti (verso SW), il profilo trasversale delle valli secondarie risulta asimmetrico con i versanti di sinistra, dove la giacitura degli strati presenta una non trascurabile componente della giacitura a “reggipoggio”, che presentano una pendenza maggiore rispetto a quelli di destra, dove la giacitura è sostanzialmente a “franapoggio”.

L'assetto morfologico e strutturale descritto comporta entità e tipologia di frane diverse. I fenomeni gravitativi più rilevanti, nella generalità dei casi, sono riconducibili a frane per colata o complesse e si sviluppano prevalentemente sui versanti destri come rielaborazione delle coltri detritiche, favoriti dalle giaciture a franapoggio delle formazioni del substrato.

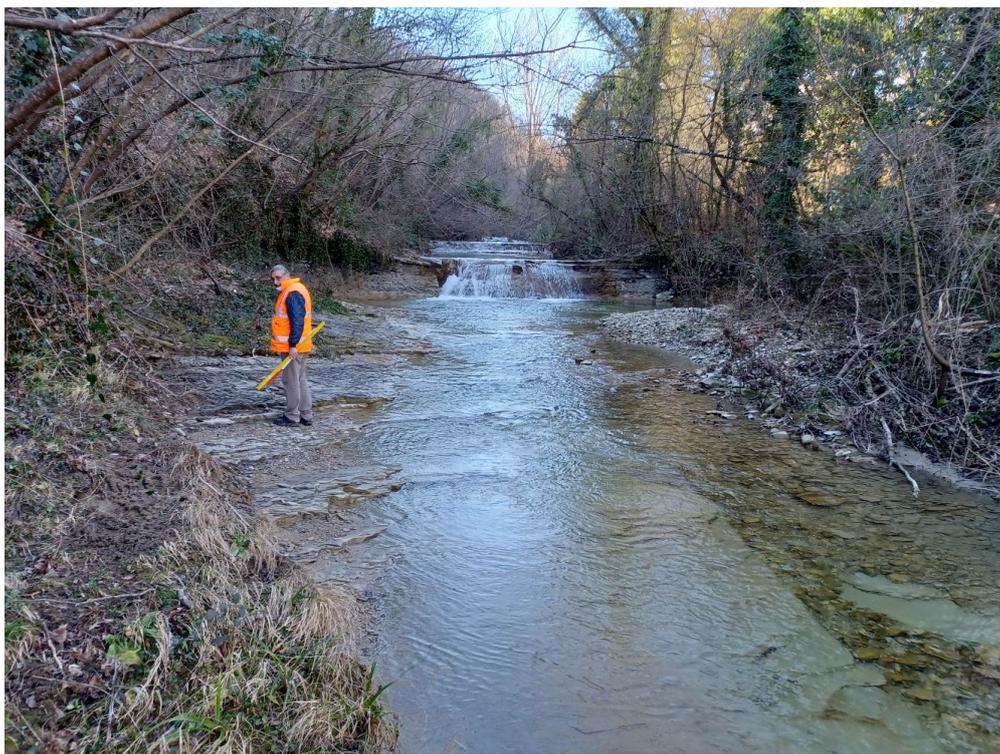


Figura 3-18 Affioramento del Membro di Corniolo nell'alveo del Torrente S. Antonio nei pressi della località Casa S. Biagio.

Invece, sui versanti sinistri, si sono osservati prevalentemente dissesti di piccole dimensioni, costituiti da sottili frane per scorrimento. In questi dissesti è possibile talora osservare la nicchia di distacco mentre il materiale di accumulo spesso manca perché asportato e disperso nell'alveo dei torrenti. Il maggior numero di quest'ultimo tipo di dissesti si osserva lungo il versante sinistro del Fosso Romito. Le frane sono in questo caso classificabili come piccoli scoscendimenti, in parte ancora attivi. Uno solo dei dissesti osservati è riconducibile ad una colata, di forma trilobata, presente nella parte più alta del fosso. Sul versante destro del Fosso Romito si osserva la colata di maggiori proporzioni della porzione di territorio rilevata. Si tratta di un accumulo franoso molto antico e quiescente i cui limiti sono di difficile definizione, quindi solo pochi elementi morfologici (gibbosità del terreno) aiutano, in una certa misura, a delimitarlo.

Maggiore interesse dal punto di vista progettuale riveste il corpo di frana per colamento quiescente posto ad oriente di Casa Cerbellino in quanto il piede del medesimo dissesto viene intercettata dal tracciato.

Altra frana per colata colma la piccola valle ad oriente di Casa Valdivatica. Pur non interferendo con il tracciato stradale, il piede della stessa giunge poco a monte del tracciato.

Piccoli movimenti per scorrimento attivi sono stati rilevati, infine, nella zona occidentale dell'area di studio e sono legati a fattori locali, quali movimentazione della coltre detritica, erosioni al piede, carente regimazione delle acque; nessuno di questi fenomeni interessa il tracciato in progetto.



Figura 3-19 Alveo Fiume Metauro caratterizzato da alti tassi erosivi costituito dal Membro di Galeata

Nel paragrafo specifico verranno analizzati i fenomeni gravitativi interferenti con il tracciato in progetto, verranno, inoltre riportate le metodologie di individuazione e cartografiche.

L'andamento dei crinali spartiacque tra le valli minori risulta parallela alla direzione degli strati, in quanto i crinali si sono per lo più delineati in corrispondenza delle testate degli strati medesimi.

La pendenza dei versanti varia in funzione della giacitura degli strati. In presenza di strati a "reggipoggio" o a "traversopoggio", i versanti assumono pendenze dell'ordine di 20°-30°. In presenza di pendenze superiori il pendio mostra una maggiore propensione ai dissesti gravitativi. Pendenze inferiori ai 20° sono tipiche quasi esclusivamente dei versanti interessati dai movimenti franosi.

Infine, lungo le parti sommitali dei versanti e/o in corrispondenza di sbancamenti, si notano diffusi fenomeni di erosione accelerata, del tipo ruscellamento areale, in grande prevalenza nei termini di composizione pelitica.

4. INTERFERENZA AREA PAI F-05-3488

Nell'elaborato T00GE01GEOCG07-08-90 sono riportate le aree PAI che corrispondono ai fenomeni gravitativi presenti nel Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) della Regione Marche, approvato in via definitiva con DPCM 14/03/2022 nella GU Serie Generale n. 108 avente ad oggetto " *Approvazione del Piano stralcio di bacino per l'assetto idrogeologico (PAI) dei bacini di rilievo regionale delle Marche (P.A.I.) Aggiornamento 2016*"; l'ultima modifica del 15/02/24 (Decreto Segretariale n. 33 del 13/02/2024) non ha interessato l'area di progetto.

Le tavole corrispondenti all'area progettuale sono la 15b, 16c e 16d.

Ad ogni fenomeno area è associata un grado di pericolosità e un grado di rischio oltre che un codice identificativo univoco, tipologia di fenomeno e stato di attività. Nell'elaborato specifico, viene associato ad ogni area un poligono al cui contorno è associato il grado di pericolosità, nella fattispecie tra pericolosità da frana moderata P1 a pericolosità elevata P3, e al cui riempimento è

PROGETTAZIONE ATI:

associato il grado di rischio da frana, nella fattispecie da rischio moderato R1 a rischio medio R2; nell'elaborato è inoltre riportata una tabella a cui è associato per ogni fenomeno identificato attraverso un "codice" la tipologia di movimento e il suo stato di attività.

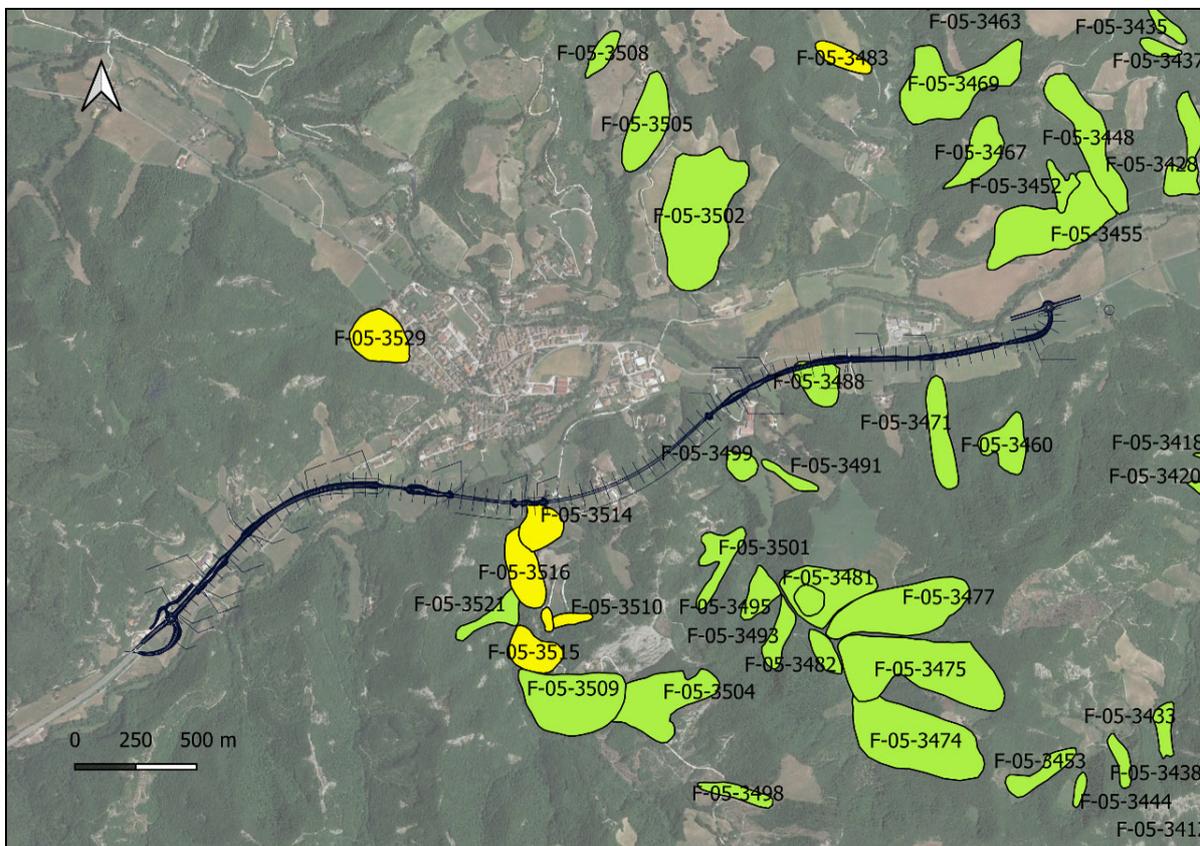


Figura 4-1 Stralcio della cartografia PAI della Regione Marche, con il tracciato in progetto.

Tra le prog. 2+920 e 3+100 è localizzata un'interferenza con un'area PAI, categorizzata come un colamento quiescente con livello di pericolosità P2 (media) e rischio R1 (moderato). Tale area è stata approfonditamente indagata durante l'attuale fase progettuale, nei successivi paragrafi vengono espone le modalità di indagine e analisi.

5. INDAGINI SPECIFICHE PER AREA PAI F-05-3488

Facendo riferimento alle "Norme di attuazione" del Piano Assetto idrogeologico della Regione Marche al comma 2 dell'art 12 dell'elaborato "d", vengono illustrati di seguito tutti i dati raccolti e le indagini svolte atte alla definizione della geometria, cinematico e stato di attività del fenomeno gravitativo classificato con cod. PAI F-05-3488.

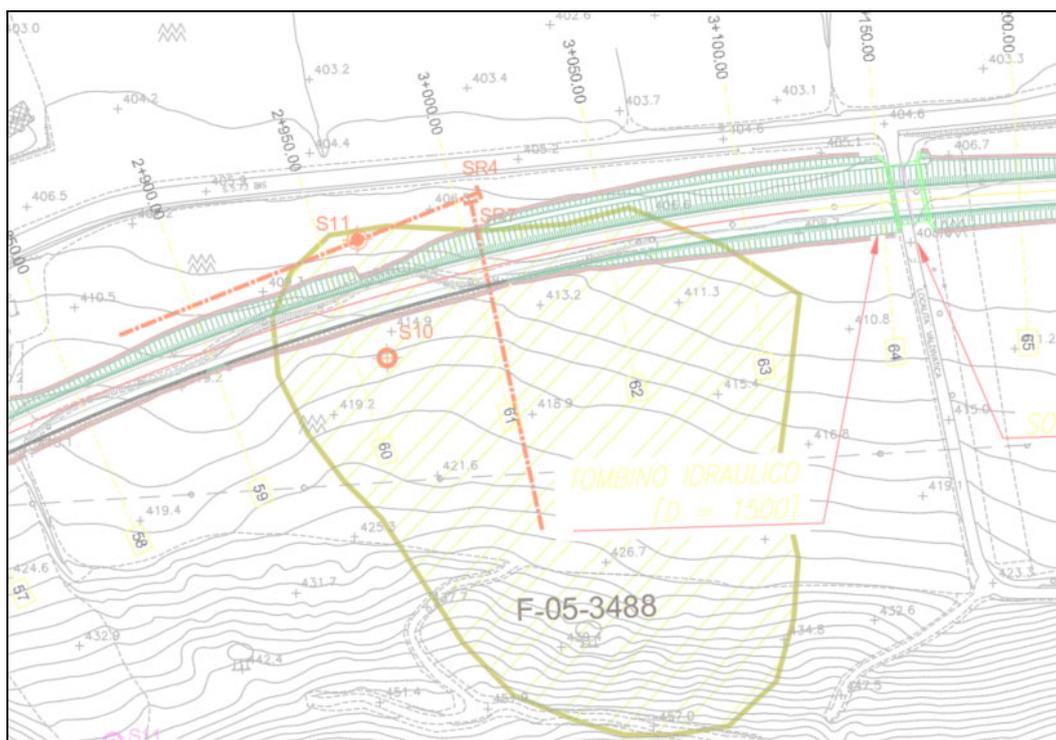


Figura 5-1 Area PAI F-05-3488 con ubicazioni indagini

5.1. INDAGINI GEOGNOSTICHE

La campagna di indagini geognostiche svolta durante l'anno 2021 ha riguardato la caratterizzazione dell'area PAI F-05-3488. In particolare sono stati effettuati:

- N. 2 sondaggi geognostici (S10 e S11), rispettivamente attrezzati con piezometro e con inclinometro.

Il monitoraggio inclinometrico sull'S10 aggiornato alla data 23/09/22, non rileva movimenti significativi.

Il monitoraggio piezometrico è aggiornato a 23/09/22.

Si riportano di seguito le stratigrafie dei due sondaggi ubicati in corrispondenza dell'area PAI.

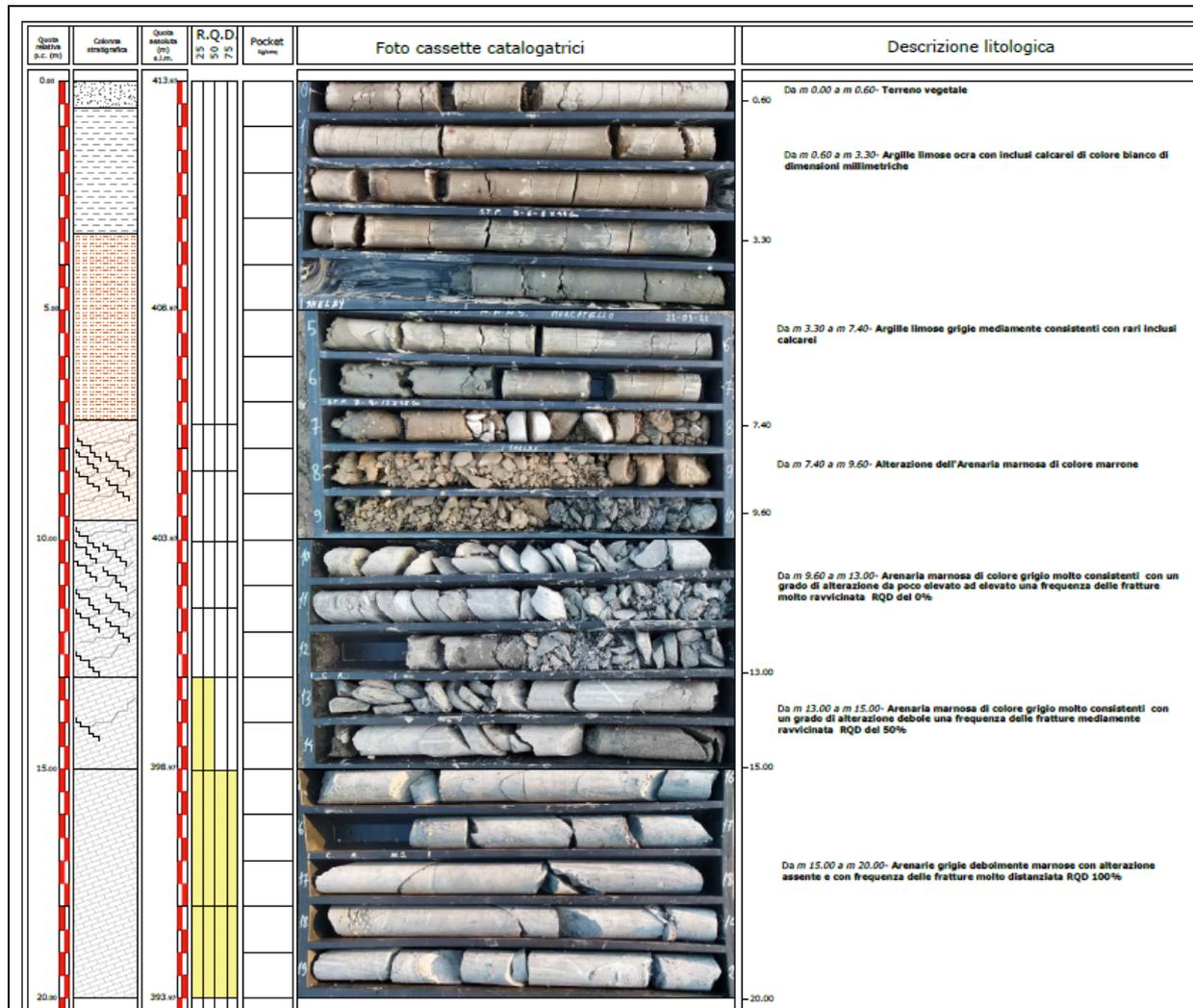


Figura 5-2 Stratigrafia S10In.

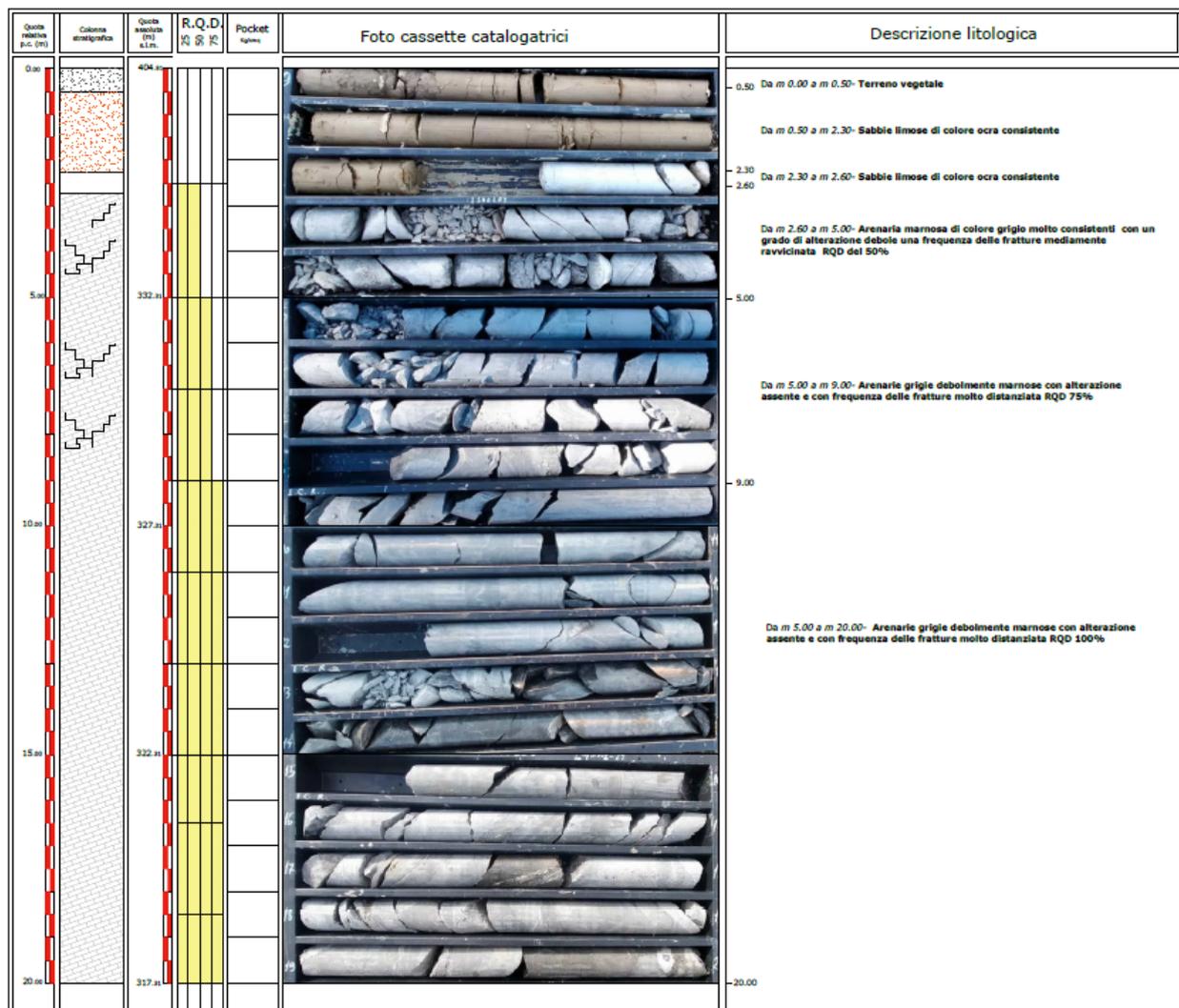


Figura 5-3 Stratigrafia S11Pz.

5.2. LABORATORIO GEOTECNICO

Le indagini di laboratorio svolte presso i fenomeni franosi di interesse, hanno riguardato campioni raccolti nei seguenti sondaggi geognostici:

| Perforazione | Anno esecuzione | Tipo di prova |
|--------------|-----------------|---------------|
| S11Pz | 2021 | TD |
| S10In | 2021 | Tx CU |

PROGETTAZIONE ATI:

| Anno | Sondaggio | Profondità | Campione | Profondità campione | | Descrizione speditiva | Classificazione AGI | Contenuto naturale d'acqua | | Peso di volume naturale | Peso di volume essiccato | Limite liquido | Limite plastico | Indice di plasticità | Indice di attività | Indice di consistenza | Granulometria | | | | Prova edometrica | Prova TD | | Prova TxCID | | Prova TxCIU | | Prova ELL | Prova DL | Prova VST |
|------|-----------|-------------|----------|---------------------|------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|----------------|-----------------|----------------------|--------------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|-------------|--------|-------------|---------|-----------|----------|-----------|
| | | | | Z _{max} | Z _{min} | | | W _n | Y _n | | | | | | | | Y _s | W _L | W _p | I _p | | I _a | I _c | Ghialia | Sabbia | Limo | Argilla | | | |
| | | (m da p.c.) | | (m da p.c.) | (m da p.c.) | | | (%) | (dM/m ³) | (kN/m ³) | (%) | (%) | (%) | (-) | (-) | (%) | (%) | (%) | (%) | (MPa) | (kPa) | (°) | (kPa) | (°) | (kPa) | (°) | (kPa) | (MPa) | (kPa) | |
| 2021 | S10 | 20 | CI1 | 4.00 | 4.50 | | | 28.00 | 18.82 | 15.03 | 48.00 | 27.00 | 21.00 | | | 14 | 4 | 36 | 46 | | | | | | | 39 | 27 | | | |
| 2021 | S11 | 25 | CI1 | 2.50 | 2.90 | | | 22.00 | 19.66 | 16.24 | 41.00 | 30.00 | 11.00 | | | 3 | 4 | 56 | 37 | 56 | 30 | | | | | | | | | |

Figura 5-4 Prove geotecniche effettuate sui campioni dei sondaggi S10 e S11.

Per i risultati completi delle prove di laboratorio, si rimanda alla Relazione T00GE00GETRE01B.

5.3. INDAGINI SISMICHE

Lungo il tracciato di Progetto sono state svolte diverse campagne geofisiche negli anni che hanno permesso di caratterizzare le aree coinvolte da fenomeni franosi. Per quanto riguarda l'area PAI F-05-3488 descritta nel si riassumono di seguito le indagini svolte:

| Indagine sismica | Anno |
|------------------|------|
| SR4 | 2021 |
| SR7 | 2021 |

Si riportano di seguito i risultati dell'elaborazioni della sismica a rifrazione SR4 - SR7 effettuata lungo il corpo di frana.

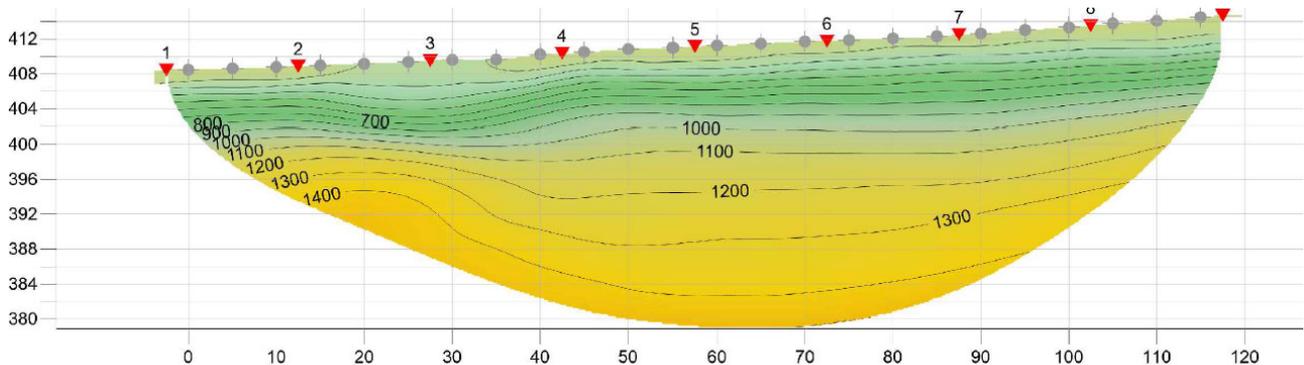


Figura 5-5 Profilo sismico SR4 ubicato poco distante dal piede del corpo di frana.

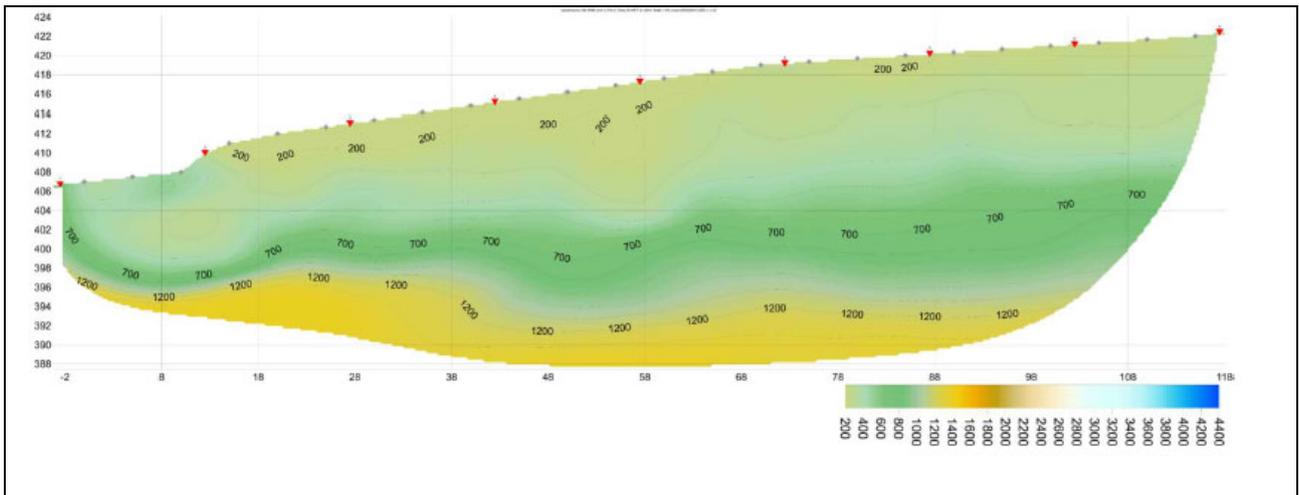


Figura 5-6 Profilo sismico SR7 ubicato longitudinalmente al corpo frana.

6. INTERFERENZA PAI F-05-3488

Il tracciato in progetto attraversa un'area affetta da problematiche gravitative riportata nel PAI (PAI F-05-3488), corrispondente parzialmente al fenomeno gravitativo CO2 riportato negli elaborati progettuali e classificato come fenomeno gravitativo complesso attivo.

La frana corrispondente all'area PAI F-05-3488 è stata confrontata con i dati di campo, e attraverso i risultati delle indagini geognostiche e alle elaborazioni, è stata parzialmente modificata per gli elaborati di progetto, e resta tuttora interferente con il tracciato.

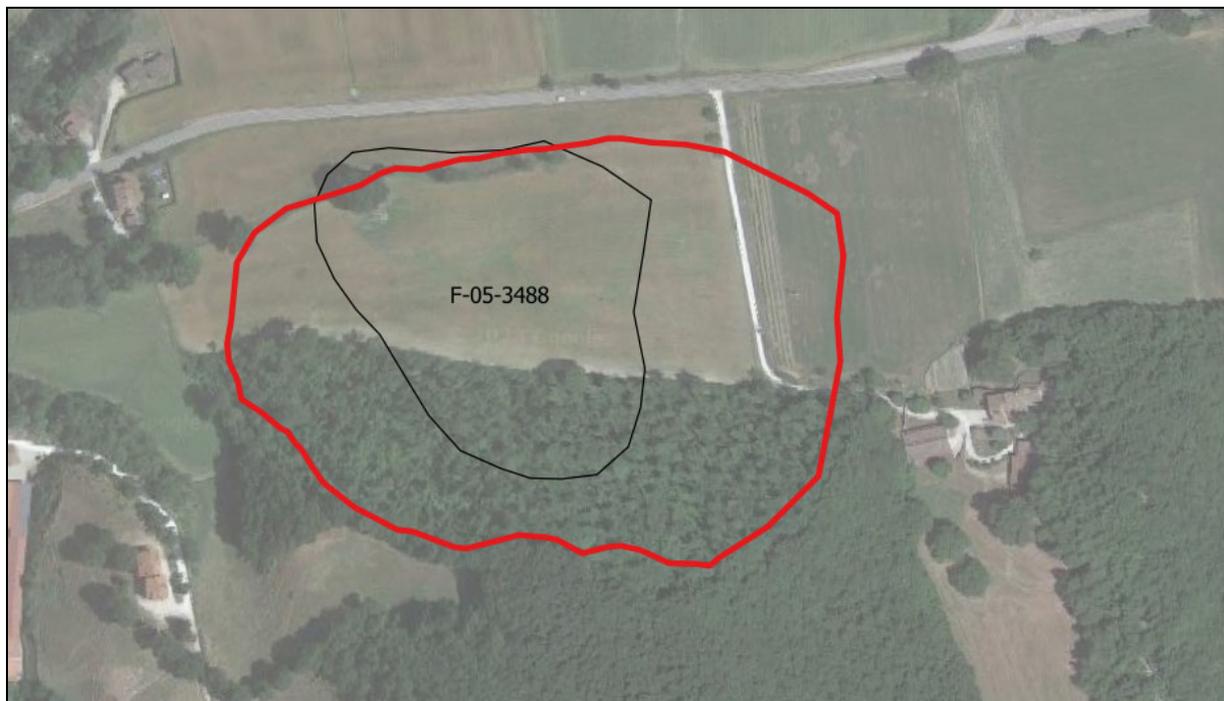


Figura 6-1 Confronto PAI (in nero) con fenomeno gravitativo ripеримetrato (in rosso)

PROGETTAZIONE ATI:

Nell'elaborato T00GE01GEOSG03 sono riportate quattro sezioni costruite trasversalmente all'asse viario e che attraversano longitudinalmente il corpo di frana (Figura 6-2).

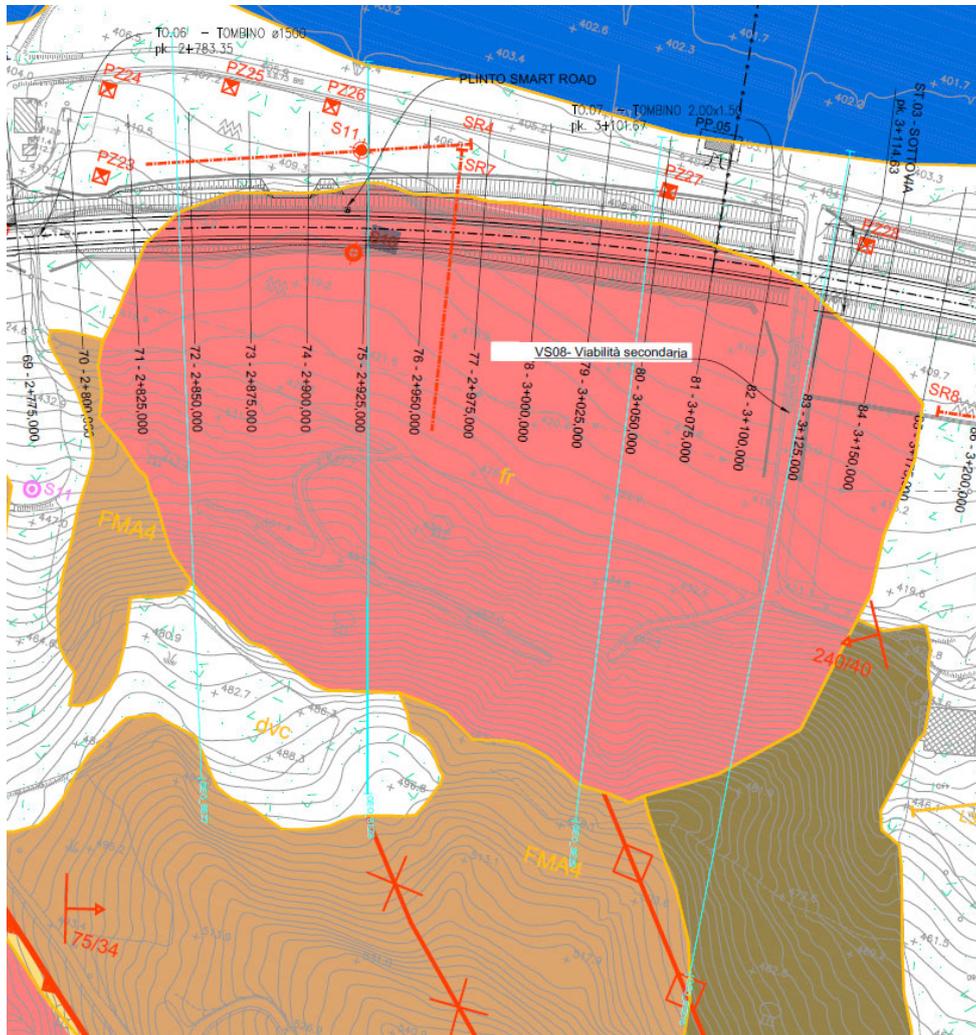


Figura 6-2 Estratto dall'elaborato di progetto T00GE01GEOCG03

Le indagini dirette e indirette hanno portato a ripерimetrare l'area PAI, in particolare la zona più a valle di questa non presenta nessun indizio di coinvolgimento in un fenomeno gravitativo, mentre le osservazioni di campo e le analisi con i modelli di elevazione digitale hanno portato ad allargare il fenomeno gravitativo, corrispondente all'area PAI, verso monte e sui due fianchi, come da elaborati progettuali.

La ricostruzione in tre dimensioni del corpo frana passa dalla definizione della sua profondità attraverso le indagini e dalla ricostruzione planimetrica attraverso le analisi di rilievo geomorfologico.

Le prove geognostiche e geofisiche, in particolar modo la SR7 e il sondaggio S10, in cui è stato installato un inclinometro, indicano una possibile superficie di scivolamento alla profondità compresa tra i 7 e i 9 m da piano campagna. Nella sismica SR7 (Figura 5-6) a monte del gradino che rappresenta il piede del fenomeno gravitativo, i valori di Vs si aggirano intorno ai 200 m/s

La stratigrafia del sondaggio S10 (Figura 5-2) tra le profondità comprese tra i 7 e 9 m da pc riporta una zona ossidata che potrebbe indicare una via preferenziale delle acque in corrispondenza di una

superficie di scivolamento, al di sotto di tale profondità il substrato è arenaceo ed in condizioni buone.

Viceversa il profilo sismico SR4 e il sondaggio S11, ubicati a valle del gradino morfologico, mostrano una situazione sostanzialmente differente: da una parte la prova geofisica indica una sezione omogenea (Figura 5-5) con un livello a basse Vs, potente non più di due metri, giustificato dai depositi eluvio colluviali, e confermato di fatto dalla stratigrafia del sondaggio S11 che già dai 2,60 m riporta il bedrock arenaceo.

I risultati delle indagini fin qui esposti, ed in particolare, i dati relativi alle stratigrafie dei sondaggi S10 e S11, intercettati lungo la sezione GEO_SEZ8, hanno permesso di ricostruire la geometria al piede e la profondità del corpo di frana.

Nell'elaborato T00GE01GEOSG03 è riportata la ricostruzione del fenomeno lungo quattro sezioni costruite trasversalmente all'asse viario: GEO_SEZ7, GEO_SEZ8, GEO_SEZ9 e GEO_SEZ10.

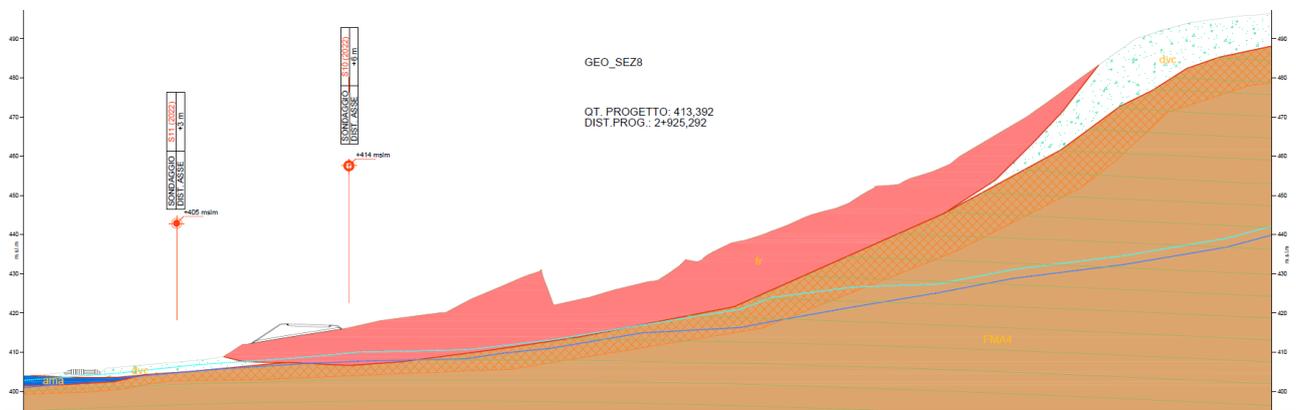


Figura 6-3 Sezione geologica GEO_SEZ8

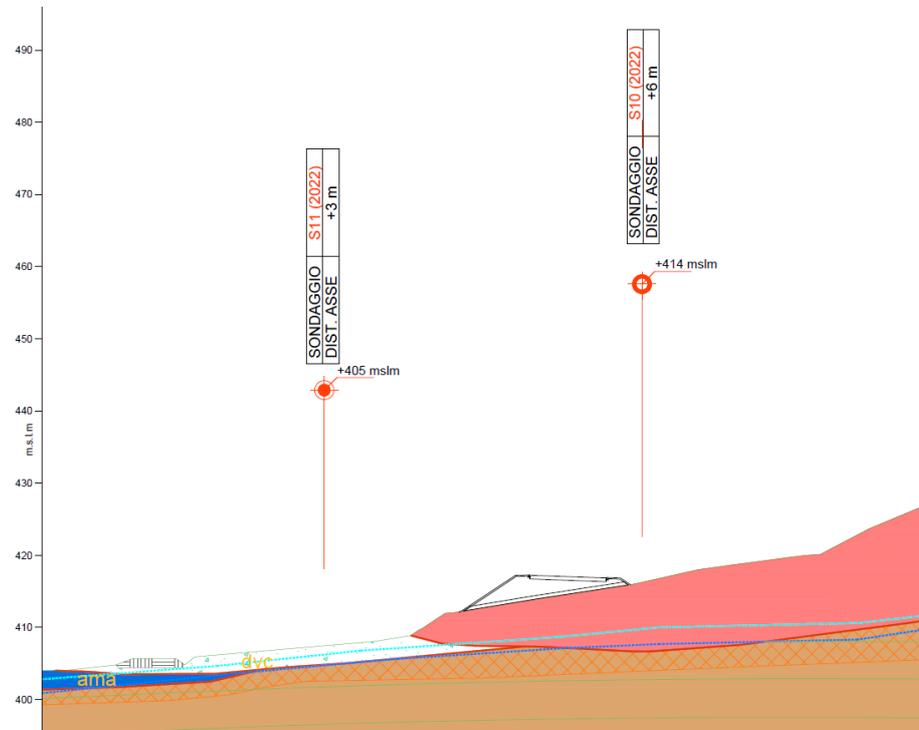


Figura 6-4 Sezione geologica GEO_SEZ8 dettaglio

PROGETTAZIONE ATI:

La ricostruzione del corpo di frana, per quanto concerne il suo sviluppo planimetrico è stata eseguita con l'ausilio del modello digitale del terreno (DTM) fornito dal Geoportale Nazionale (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare - Direzione Generale per la Salvaguardia del Territorio e delle Acque).

In particolare è stato possibile ricostruire l'area interessata dal fenomeno attraverso sezioni e carte di pendenze.

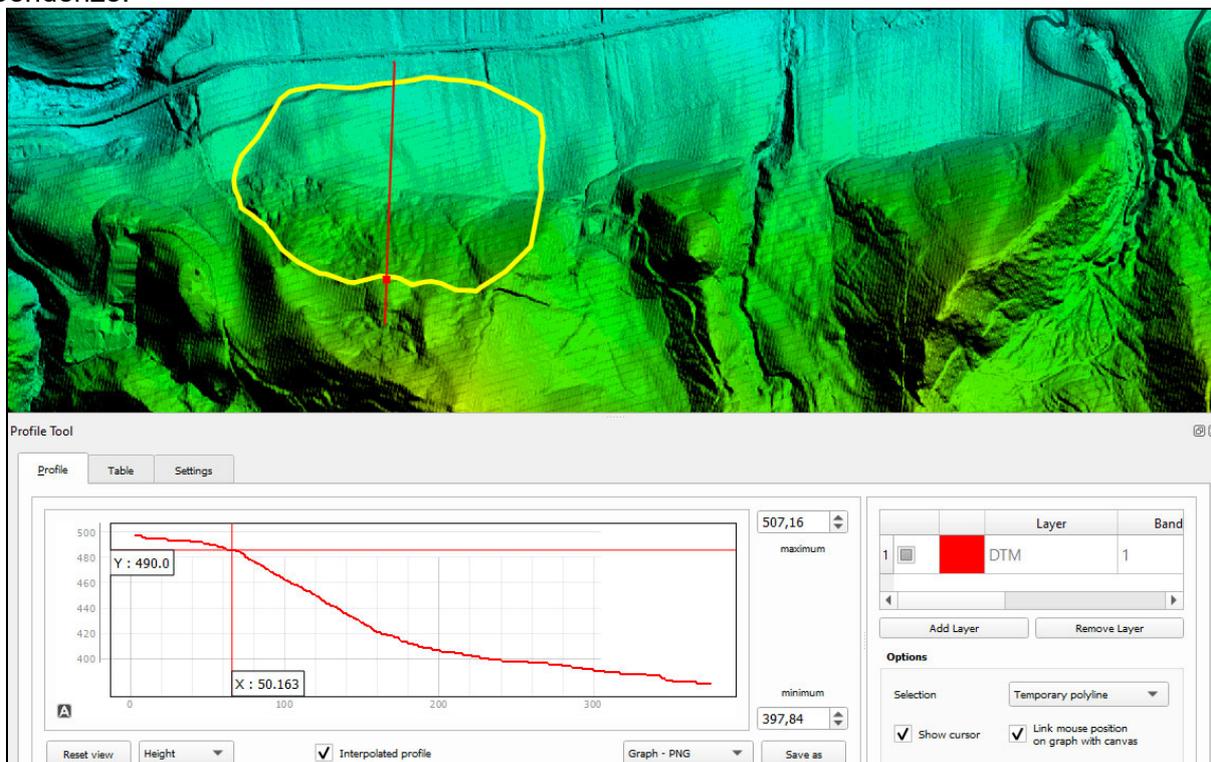


Figura 6-5 Ricostruzione area in frana

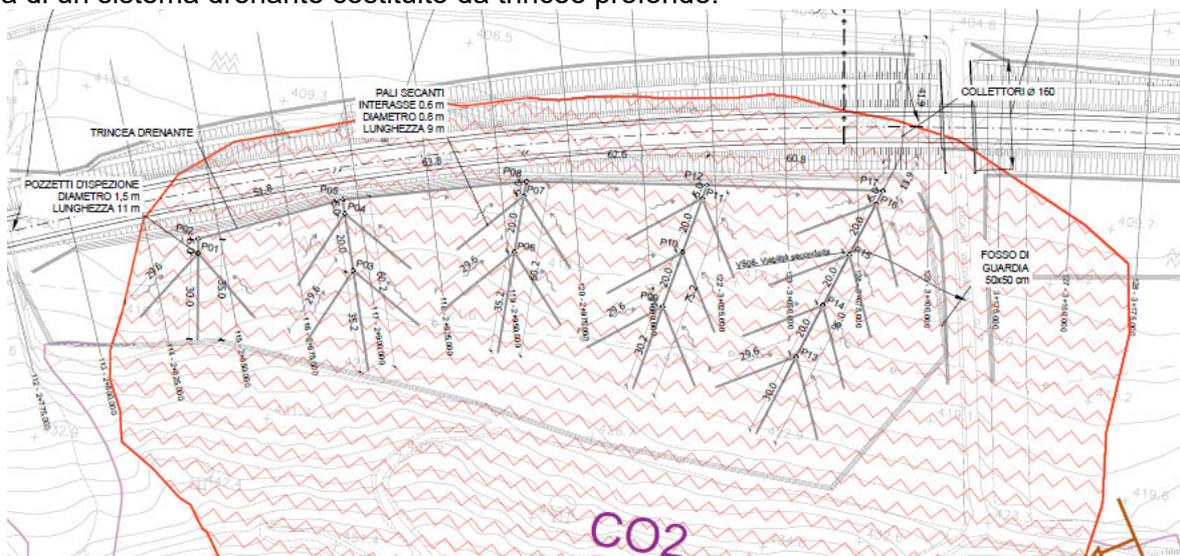
Il monitoraggio inclinometrico aggiornato alla data 23/09/22 non rileva movimenti significativi, ma dal rilievo di campo si è potuto appurare che almeno superficialmente il fenomeno sia attivo, dimostrato dalla rotazione di alcuni manufatti e alberi (Figura 6-6), ed è caratterizzato da un movimento complesso, poiché a monte è stata ricostruita una zona di coronamento con un probabile movimento rotazionale, mentre nella porzione mediana e di piede il movimento è assimilabile ad un colamento.



Figura 6-6 Panoramica da fianco destro del fenomeno CO2

Inoltre il monitoraggio piezometrico eseguito nello strumento S11 (Figura 3-15) ha permesso di ricostruire la superficie di falda: si è visto che, in corrispondenza del piezometro, tra i mesi di aprile e settembre 2022 la superficie di falda sia oscillata tra 1.10 e 2.88 m da pc, che rappresenta la profondità di interfaccia tra i depositi eluvio colluviali e il bedrock. Considerando che il monitoraggio piezometrico non comprende periodi dell'anno particolarmente umidi, si può facilmente ipotizzare che il versante a seguito di precipitazioni intense possa imbibirsi, sia per effetto delle precipitazioni che per la risalita della superficie piezometrica, aumentando di fatto le pressioni interstiziali diminuendo la resistenza al taglio.

Per garantire le condizioni di stabilità della porzione del versante nell'intorno si prevede la messa in opera di un sistema drenante costituito da trincee profonde.



7. INTERVENTO DI STABILIZZAZIONE FRANA COMPLESSA CO2

7.1. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Per il dimensionamento delle trincee drenanti si è fatto riferimento ai seguenti parametri geotecnici:

UG1 – Depositi di frana

| | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| Peso dell'unità di volume | $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ |
| Coesione efficace | $c' = 0 \text{ kPa}$ |
| Angolo di resistenza a taglio | $\phi' = 27^\circ$ |
| Modulo di Young | $E = 5 \text{ MPa}$ |
| Coeff. di Poisson | $\nu = 0,30$ |
| Permeabilità | $k = 10\text{E-}06 \text{ m/s}$ |

7.2. INTERVENTI DI PROGETTO PREVISTI

Per garantire le condizioni di stabilità della porzione del corpo di frana nell'intorno delle opere di linea, si prevede la posa in opera di un sistema drenante costituito da trincee profonde, le cui caratteristiche principali sono di seguito elencate:

| | |
|------------------------|---------------------|
| Larghezza base trincea | $B = 0.8 \text{ m}$ |
| Altezza trincea | $H_0 = 8 \text{ m}$ |
| Interasse | $S = 20 \text{ m}$ |

Gli studi geologici indicano che l'altezza della trincea necessaria a garantire la variazione della pressione interstiziale sulla superficie di scorrimento del corpo di frana può essere ragionevolmente assunta coincidente con la superficie di contatto tra la coltre superficiale rimaneggiata e il substrato marnoso arenaceo. Le indagini geognostiche (sondaggio S10) hanno evidenziato che, nell'area in esame, tale superficie di contatto si trova ad una profondità compresa tra 0,50 m e 7,50 m. Di conseguenza, in fase di esecuzione, si dovrà assicurare che i pali drenanti siano opportunamente intestati nel substrato marnoso-arenaceo. Per i dettagli costruttivi del sistema di drenaggio si rimanda all'elaborato grafico (*codice elaborato T00GE00GETDI03*).

7.2.1. ANALISI DELLE CONDIZIONI DI ATTIVAZIONE DEI MECCANICISMI DI INSTABILITÀ (ANTE OPERAM)

L'analisi delle condizioni di attivazione dei meccanismi di instabilità del versante è stata svolta con riferimento alla sezione "GEO_SEZ08" (*codice elaborato T00GE01GEOSG03*).

7.2.1.1. Verifica di stabilità ante operam

Nel caso di un movimento di versante classificato come attivo, è possibile eseguire un'analisi a ritroso (*back analysis*) per ricercare le condizioni che inducano l'attivazione del meccanismo osservato. In particolare, fissata la geometria di riferimento del problema e assumendo nullo il contributo della coesione (frana attiva o frana quiescente che ha subito spostamenti tali da raggiungere le condizioni di resistenza residue) è possibile risalire ai parametri (in questo caso angolo di resistenza a taglio e posizione della superficie libera della falda) che producono il raggiungimento delle condizioni di incipiente scorrimento del pendio ($FS = 1$).

Di seguito si riporta uno schema del modello geotecnico utilizzato e i risultati ottenuti dall'analisi a ritroso in termini di angolo di resistenza a taglio e posizione della superficie libera della falda.

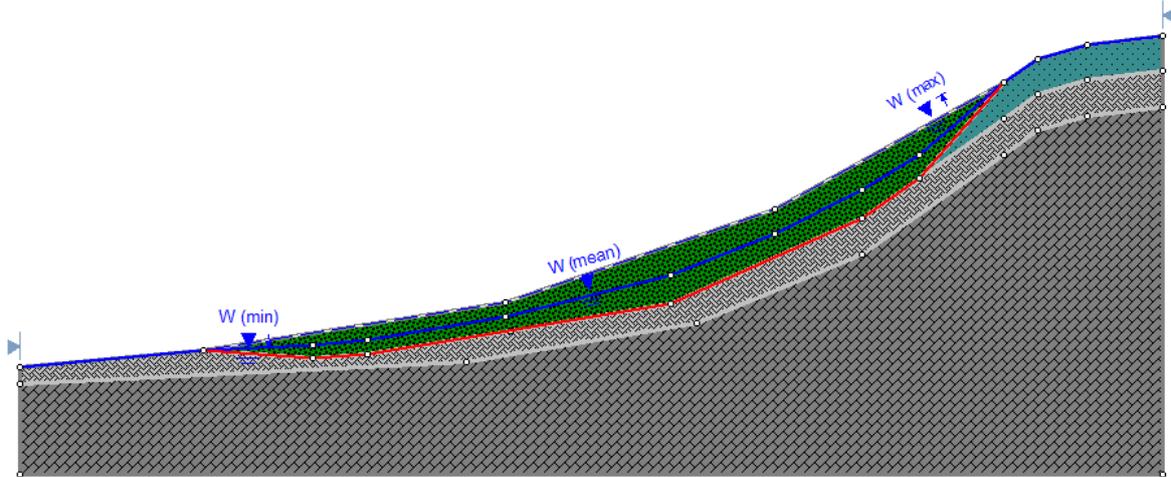
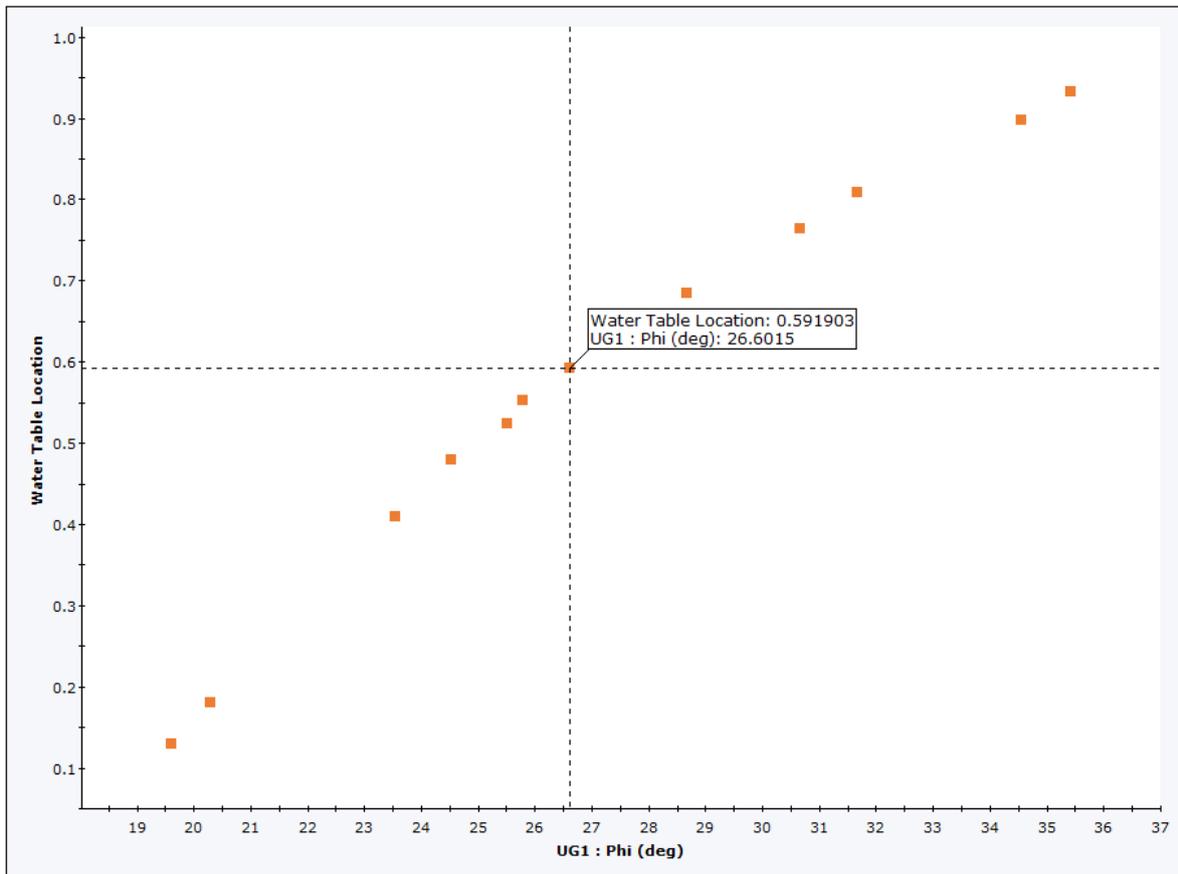


Figura 7-1 Schema del modello geotecnico utilizzato per la *back analysis*

Highlighted Data = Factor of Safety - bishop simplified Range ≥ 0.99 to ≤ 1.01 (12 points)



▲ Primary Data ■ Highlighted Data

Correlation Coefficient=0.985805, alpha=-0.772977, beta=0.0496651 (Highlighted Data Only)

Nel precedente grafico sono evidenziate le coppie di punti angolo di resistenza a taglio e posizione della falda che producono un coefficiente di sicurezza FS pari a 1, dove 0 indica una posizione della falda alla base del deposito di frana e 1 indica una posizione della falda in corrispondenza del piano campagna. Confrontando i risultati dell'analisi con i risultati delle prove in sito e in laboratorio, si stima un valore dell'angolo di attrito in condizioni di incipiente scorrimento del pendio pari a $\varphi'_{res} = 25^\circ \div 27^\circ$ e una posizione della falda pari a $0,6H$, dove H rappresenta lo spessore medio del deposito di frana all'interno del modello numerico.

Tale condizione costituisce lo scenario di riferimento per il dimensionamento dell'intervento di stabilizzazione previsto per il caso in esame. Si considera, dunque:

Fattore di sicurezza iniziale FS_0 1,00

Analogamente, mediante un'analisi di stabilità in condizioni di pressione interstiziale nulla lungo la superficie di scorrimento si valuta il fattore di sicurezza massimo, da cui:

Fattore di sicurezza massimo ($u = 0$ kPa) FS_{max} 1,50

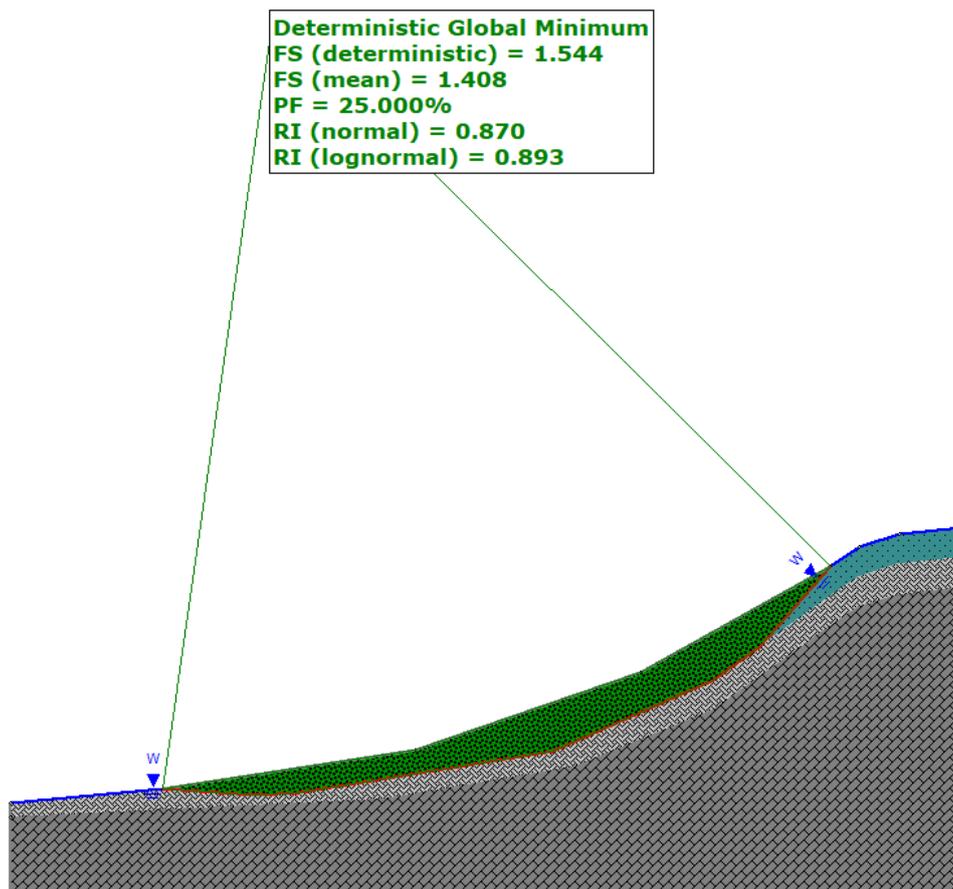


Figura 7-2 Analisi di stabilità in condizioni di pressione interstiziale nulla lungo la superficie di scivolamento

7.2.2. ANALISI DELLE CONDIZIONI DI STABILITÀ IN PRESENZA DEGLI INTERVENTI (POST OPERAM)

7.2.2.1. Risultati dell'analisi di stabilità (*post operam*)

Valutazione del massimo incremento del coefficiente di sicurezza

Nel § 7.2.1 sono state analizzate le condizioni *ante operam* del pendio che determinano l'innesco dei meccanismi di instabilità. Nello specifico, quando la superficie libera della falda è prossima al valore di $0,6H$ il coefficiente di sicurezza iniziale, in assenza dell'intervento di drenaggio è pari a $FS_0 = 1,00$.

Il valore massimo del coefficiente di sicurezza FS_{max} è stato stimato nell'ipotesi di coesione nulla ($c' = 0$ kPa), imponendo che la pressione interstiziale sia nulla ($u = 0$ kPa) lungo la superficie di scorrimento. Si ottiene $FS_{max} = 1,50$.

Il massimo incremento ottenibile del coefficiente di sicurezza è quindi $\Delta FS_{max} = 0,50$.

Calcolo dell'efficienza media a regime

Sulla base delle caratteristiche dell'intervento descritte al § 7.1 e in accordo con le grandezze geometriche precedentemente introdotte, si assume:

| | |
|---|--------|
| $n = H/H_0$ | 1,00 |
| B/H_0 | 0,10 |
| D/H_0 | 1,00 |
| Incremento massimo fattore di sicurezza ΔFS_{max} | 0,50 |
| Interasse S | 20,0 m |
| Rapporto S/ H_0 | 2,50 |
| Efficienza media a regime E_∞ | 0,48 |

Il valore dell'efficienza media a regime \bar{E}_{cc} è stato stimato in funzione del rapporto S/H_0 .

In condizioni di regime, dunque, l'intervento previsto è in grado di garantire un'efficienza del 48% lungo un piano posto alla profondità della superficie di scorrimento ($D/H_0 = 1$).

Ai fini della stabilità del pendio, la valutazione dell'efficienza media a regime del sistema drenante è riferita al piano coincidente con la superficie di scorrimento. L'altezza della trincea ($H_0 > H_{sub}$) garantisce un'adeguata penetrazione degli elementi drenanti nel substrato stabile.

CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI SICUREZZA E DEL FATTORE TEMPO AL 90%

Il fattore tempo al 90% rappresenta il tempo necessario all'opera per raggiungere un'efficienza del 90%.

| | |
|---|-------------|
| Fattore tempo al 90% T_{90} | 0,42 |
| Tempo in giorni, al raggiungimento di un'efficienza del 90% | 0,06 giorni |
| Efficienza media al 90% $E_{(t90)}$ | 0,44 |
| Incremento fattore di sicurezza al 90% $\Delta FS_{(t90)}$ | 0,22 |
| Fattore di sicurezza al 90% $FS_{(t90)}$ | 1,22 |

Il valore del fattore tempo al 90% T_{90} è stato stimato in funzione del rapporto S/H_0 .

In condizioni di regime, dunque, l'intervento previsto è in grado di garantire un margine di sicurezza pari a $FS_m = 1,22$. Il margine di sicurezza raggiunto in presenza dell'intervento risulta adeguato poiché è maggiore o uguale del valore tipicamente riportato in letteratura, $FS = 1,20$ (Cartier & Pouget, 1988), in corrispondenza del quale si considerano arrestati i movimenti di una frana a seguito di interventi di stabilizzazione.

7.3. SCENARIO DI RIFERIMENTO PER LA PROGETTAZIONE DELLE OPERE DI LINEA

Le opere di linea interagenti con il corpo di frana, inizialmente attivo nelle condizioni *ante operam*, sono state progettate con riferimento alle condizioni *post operam*, coincidenti con le condizioni di regime del sistema drenante. In particolare, richiamando la definizione di efficienza media a regime, si ha:

$$\bar{E}_m = \frac{u_0 - \bar{u}_m}{u_0} = 1 - \frac{\bar{u}_m}{u_0} \quad (10)$$

in cui $\bar{u}_m = \gamma_w \cdot z_w^m \cdot \cos^2 \beta$ è la pressione interstiziale media sulla superficie di scorrimento nelle condizioni di regime del sistema drenante (*post operam*, $FS_m = 1,22$) e $u_0 = \gamma_w \cdot z_w \cdot \cos^2 \beta$ è il valore nelle condizioni di incipiente scorrimento (*ante operam*, $FS_0 = 1,00$).

Combinando le due precedenti relazioni con l'Eq. 10 si ottiene la posizione media della superficie libera della falda (a partire dalla superficie di scorrimento) in condizioni di regime del sistema drenante:

$$z_w^m = (1 - \bar{E}_m) z_w = (1 - 0,48) \cdot 0,6 \cdot 8,0 = 2,5 \text{ m}$$

La profondità di riferimento della superficie libera della falda, a partire dal piano campagna, per la progettazione delle opere di linea è quindi:

$$H - z_w^m = 8,0 - 2,5 = 5,50 \text{ m}$$

8. CONCLUSIONI

In riferimento alle condizioni di stabilità geomorfologica e geotecnica, le opere progettuali così come previste tendono a ridurre al minimo sia il rischio d'instabilità gravitativa che le modificazioni della morfologia attuale dei pendii. Gli approfondimenti condotti hanno consentito di inquadrare e valutare le condizioni di stabilità geomorfologica e geotecnica delle aree interessate.

Il monitoraggio inclinometrico effettuato durante l'anno 2022 non evidenzia movimenti significativi. Tuttavia, dal rilievo di campo in cui sono stati osservati spostamenti di alcuni manufatti e alberi, il fenomeno è da ritenersi attivo, almeno superficialmente.

Le indagini dirette e indirette, coadiuvate ad analisi geomorfologiche e ad un rilievo di campo di dettaglio, hanno permesso di definire al meglio la geometria nelle tre dimensioni della frana CO2 in parte corrispondente all'area PAI F-05-3488.

La frana CO2 viene classificata come fenomeno gravitativo complesso e rispetto all'area PAI F-05-3488 risulta più estesa a monte, su fianco sinistro e fianco destro, mentre nell'area di piede la sua estensione è stata ridotta per chiare evidenze morfologiche.

Per garantire le condizioni di stabilità della porzione del versante nell'intorno si prevede la messa in opera di un sistema drenante costituito da trincee profonde.

Le soluzioni progettuali adottate sono volte a ridurre il livello di pericolosità e di rischio connesso alla realizzazione dell'infrastruttura, garantendone la messa in sicurezza in relazione all'ambito territoriale interessato.

Le verifiche di stabilità sono state eseguite considerando tutte le azioni previste dalla norma. Si sono valutati i fattori di sicurezza rispetto allo scorrimento lungo le superfici di rottura considerate, e si sono dimensionati di conseguenza gli interventi progettuali.

Dai riscontri condotti sul campo, dai dati di monitoraggio al momento disponibili, e dalle soluzioni progettuali adottate non sono stati individuati elementi tali da far ipotizzare la presenza di condizioni di rischio per l'opera da realizzare.