



CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA

AREA SERVIZI TERRITORIALI METROPOLITANI

STRADA SP610	Settore Strade e Sicurezza			
LAVORO LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA SP610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA SP 14 IN COMUNE DI IMOLA CUP C27H24001080001 CIG B2D7BDC2BB				
ELABORATO Parte Specialistica Relazione geotecnica	PROGETTO ESECUTIVO			
PROGETTAZIONE GENERALE E SPECIALISTICA SOIL ENGINEERING SRL <i>Dott. Ing. Massimo Maffei</i> <i>Dott. Ing. Luigi Albert</i> <i>Dott. Ing. Lucio Garassino</i> <i>Dott. Geol. Fabio Staffini</i> (Integrazione attività specialistiche e coordinatore per la sicurezza)				
RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Dott. Ing. Lucia Molica Franco SUPPORTO AL RUP Dott. Ing. Stefania Cintura				
B			SCALA	TAV./ELAB Nr.
A	MAGGIO 2025	EMISSIONE		203-A
REV.	DATA	MODIFICA		

QUESTO DISEGNO E LA RELATIVA INVENZIONE SONO DI PROPRIETA' DELL'AMMINISTRAZIONE
NON NE E' CONSENTITO L'UTILIZZO SE NON SU ESPLICITA AUTORIZZAZIONE
OGNI DIRITTO A TALE RIGUARDO E' ESPRESSAMENTE RISERVATO ED ESCLUSIVO

 CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	
	Data	Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 1/40

INDICE

1	PREMESSA	3
2	NORME, RACCOMANDAZIONI E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	6
2.1	Norme e Raccomandazioni di riferimento	6
2.2	Documenti di riferimento	6
3	UBICAZIONE DELL'AREA E STATO DEI LUOGHI	7
3.1	Ubicazione dell'area di intervento	7
3.2	Stato dei luoghi	8
4	PRESTAZIONI RICHIESTE ALLE OPERE	10
5	DESCRIZIONE DELLE OPERE, CARATTERISTICHE DEI MATERIALI STRUTTURALI E FASI COSTRUTTIVE	11
6	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA	12
6.1	Geologica locale	12
6.2	Geomorfologia	12
6.3	Cenni di idraulica locale	15
6.4	Modello geologico di riferimento	15
7	CAMPAGNE D'INDAGINE DISPONIBILI	16
7.1	Campagne eseguite nell'area	16
7.1.1	Campagna 2024 - "Lavori di Somma Urgenza per il ripristino della sede stradale e delle scarpate di monte e di valle colpiti dagli eventi metereologici di settembre 2024, lungo la SP 610, "Montanara" nei territori di Imola, Fontanelice, Casalfiumanese, Borgo Tossignano a Castel del Rio"	18
7.1.2	Campagna 2025 - Interventi urgenti di ripristino dissesti SP610	19
7.2	Indagini sui materiali caotici provenienti dalla formazione Marnoso-Arenacea alterata	21
8	CRITERI DI CARATTERIZZAZIONE	23
8.1	Considerazioni circa i criteri di caratterizzazione geotecnica adottati	23
8.1.1	Criticità legate all'interpretazione da prove in sito	23
8.1.2	Criticità legate all'interpretazione da prove in laboratorio	24
8.2	Metodologia di analisi dei risultati	24
8.2.1	Classificazione	24
8.2.2	Determinazione delle caratteristiche di resistenza in termini di sforzi efficaci	24
8.2.3	Determinazione delle caratteristiche di resistenza in termini di sforzi totali (terreni a grana fine)	25
8.2.4	Determinazione delle caratteristiche di deformabilità	25
9	UNITÀ GEOTECNICHE	27
9.1	Descrizione delle unità geotecniche	27
9.2	Schema stratigrafico di riferimento	29
10	CARATTERIZZAZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE	30
10.1	Prove in sito	30
10.1.1	Caratteristiche di resistenza in tensioni totali	30
10.1.2	Caratteristiche di deformabilità	31

 CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	Data Maggio 2025 Rev. 01 Pag. 2/40

10.2	Risultati delle prove Di Laboratorio	32
10.2.1	Ug1 – Coltre di copertura	32
10.2.2	Ug2 – Detrito di versante	35
10.2.3	Ug3 – Formazione alterata	38
11	QUADRO SINOTTICO DEI RISULTATI	40

 CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	
	Data	Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 3/40

1 PREMESSA

A seguito degli eventi meteorologici del maggio 2023 e del settembre 2024 che del hanno colpito una vasta porzione della Regione Emilia-Romagna, generando intensi ed estesi effetti al suolo, nelle aree collinari e appenniniche del bolognese, del ravennate e del forlivese, si sono verificate un totale di 65.598 frane, che coprono complessivamente un'area di 72,21 km².

All'interno del territorio comunale di Castel de Rio (BO) sono state censite numerose frane che hanno coinvolto anche la sede stradale della SP610, limitandone in alcuni casi la percorribilità. La presente relazione ha per oggetto il dissesto che ha interessato la sede stradale e la scarpata di valle al km 59+500 della SP610 "Montanara" poco a sud dell'attraversamento del fiume Santerno.

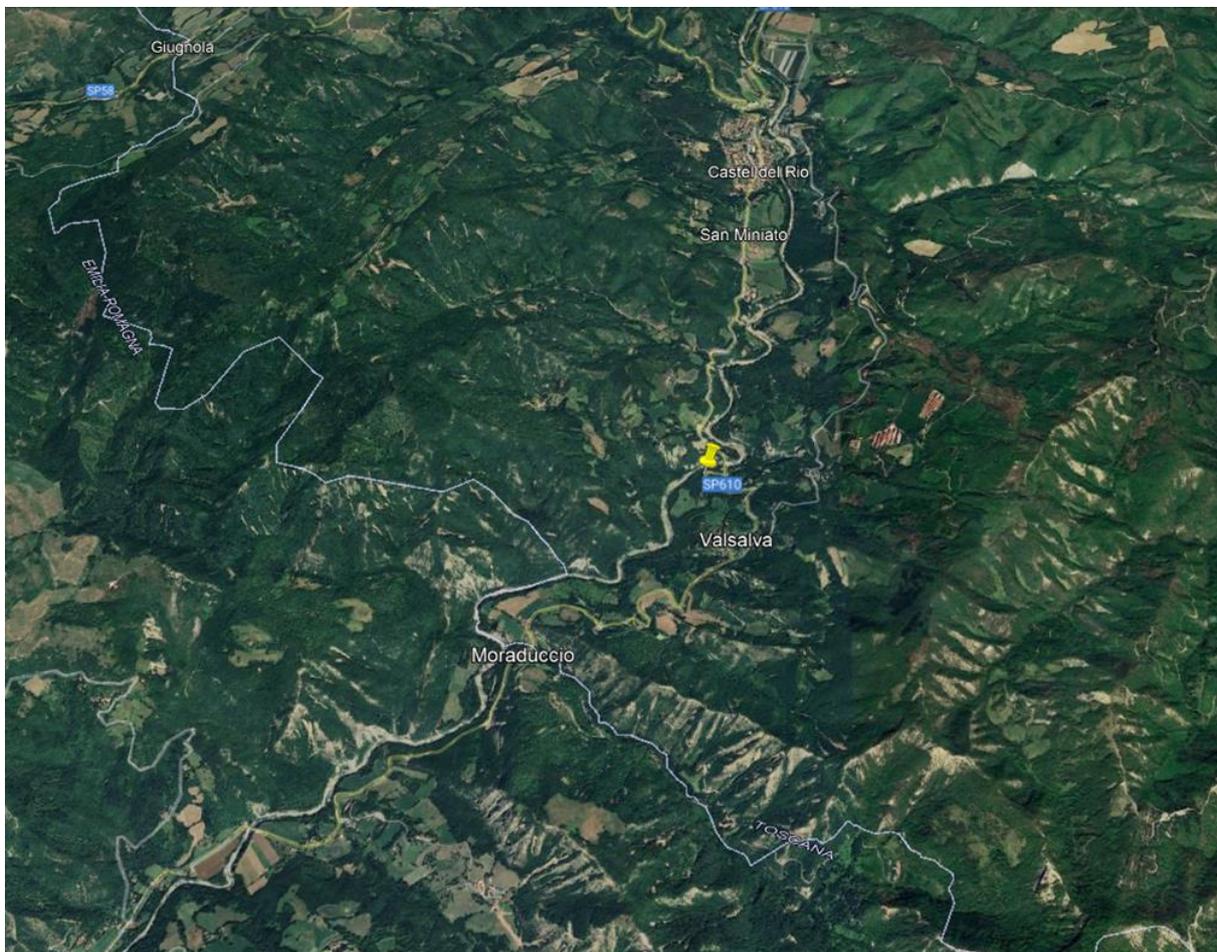


Figura 1 - Inquadramento dell'area d'intervento (da Google Earth)

Il dissesto, causato dal franamento del terreno di fondazione del muro di sottoscarpa e successivamente lo svuotamento di parte del rilevato, si è manifestato nella formazione di una cavità al di sotto della carreggiata esterna.

Attualmente, il traffico avviene a senso unico alternato lungo la corsia interna.

Il muro di contenimento adiacente al dissesto, anche se ancora in posto, è scalzato al piede, localmente lesionato e distaccato dal cordolo porta barriera di sommità.



Figura 2 - Tratto di dissesto della sede stradale

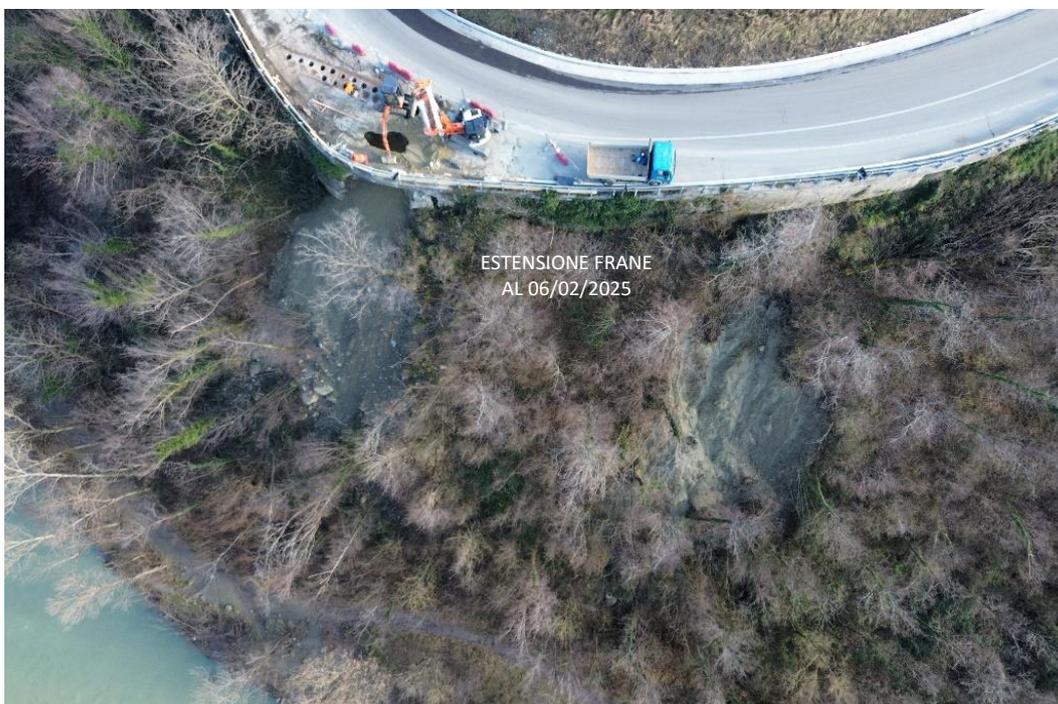


Figura 3 – Dissesto nell'area oggetto di intervento

Il presente documento è rivolto alla caratterizzazione geotecnica di dettaglio dei terreni e degli ammassi rocciosi sulla base del quadro sperimentale oggi disponibile, che ha permesso di ricostruire il modello geologico/geotecnico delle opere in progetto e stabilire con dettaglio adeguato le caratteristiche meccaniche dei terreni ricadenti nel volume significativo delle opere in progetto.

 CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA		
	RELAZIONE GEOTECNICA		Data Maggio 2025
			Rev. 01 Pag. 5/40

Tale quadro sperimentale ha fornito gli elementi necessari alla scelta dei parametri geotecnici rappresentativi delle opere in relazione a tutti gli stati limite da verificare.

La presente relazione tecnica presenta lo sviluppo progettuale degli aspetti di caratterizzazione geotecnica dei materiali ricadenti all'interno del volume di influenza delle opere in progetto coerentemente con i contenuti richiesti dal D.Lgs 31 marzo 2023 n.36 (Codice dei contratti pubblici 2023) e dal DM Infrastrutture 17 gennaio 2018 (i.e. NTC 2018).

 CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA		
	RELAZIONE GEOTECNICA		Data Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 6/40	

2 NORME, RACCOMANDAZIONI E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 NORME E RACCOMANDAZIONI DI RIFERIMENTO

- 2.1.1 D.M. 17 gennaio 2018 – pubblicato su GU Serie Generale n.42 del 20-02-2018 - Suppl. Ordinario n. 8 – “Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»”;
- 2.1.2 Circolare 21 gennaio 2019 n.7 “Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;
- 2.1.3 EN1992 – 1 – Progettazione delle strutture in calcestruzzo parte 1: regole generali per gli edifici;
- 2.1.4 EN 1993 -5 – “Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 5: Piling”;
- 2.1.5 UNI EN 1997-1:2005: "Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali";
- 2.1.6 EN 14199:2005 – “Execution of special geotechnical works – Micropiles”
- 2.1.7 British standard BS8002: Code of practice for earth retaining structures

2.2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- 2.2.1 Interventi urgenti di ripristino dissesti SP610”:
 - CMDB-001-DD-REL-201-A - “Relazione geologica”;
 - CMDB-001-DD-REL-202-A - “Relazione sismica”;
- 2.2.2 “Lavori di Somma Urgenza per il ripristino della sede stradale e delle scarpate di monte e di valle colpiti dagli eventi metereologici di settembre 2024, lungo la SP 610, “Montanara” nei territori di Imola, Fontanelice, Casalfiumanese, Borgo Tossignano a Castel del Rio”:
 - Elenco elaborati E-1-0-0-B (Febbraio 2025)
 - Relazione generale tecnico – illustrativa E-1-1-0-B (Febbraio 2025)
 - Relazione geologica e sismica E-1-2-0-B (Febbraio 2025)
 - Relazione geotecnica e strutturale E-1-3-0-B (Febbraio 2025)
 - Intervento 4 – Stato di Fatto E-2-3-3-B (Febbraio 2025)
 - Intervento 4 – Progetto: Tavola degli interventi E-2-4-10-B (Febbraio 2025)
- 2.2.3 MICROZONAZIONE SISMICA Regione Emilia-Romagna - Comune di Castel del Rio 2017
 - Relazione illustrativa;
 - Carta delle frequenze;
 - Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica;
 - Carta delle indagini;
 - Carta di microzonazione sismica FPGA;
- 2.2.4 Dati disponibili sulla BANCA DATI DELLE PROVE GEOGNOSTICHE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA eseguite sul medesimo materiale nell’abitato di Rocca San Casciano distante circa 30 km dall’area di interesse

Il set completo dei documenti vigenti, oltre a quelli elencati sono reperibili nel sito web:

- <https://www.nuovocircondarioimolese.it/psc-rue/enti/castel-del-rio/psc-rue-ca-elaborati-vigenti/microzonazione-sismica-ii-livello>;
- <https://geo.regione.emilia-romagna.it/schede/pnsrs/index.jsp?id=37014>
- <https://servizimoka.regione.emilia-romagna.it/mokaApp/apps/geg/index.html>

	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	
	Data	Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 7/40

3 UBICAZIONE DELL'AREA E STATO DEI LUOGHI

3.1 UBICAZIONE DELL'AREA DI INTERVENTO

L'intervento in oggetto è situato nel comune di Castel del Rio (BO) al km 59+500 della SP 610.

Le coordinate indicative del sito sono (Figura 4):

- Latitudine: 44,186882° N
- Longitudine: 11,50082° E
- Quota: 240 m s.l.m. circa

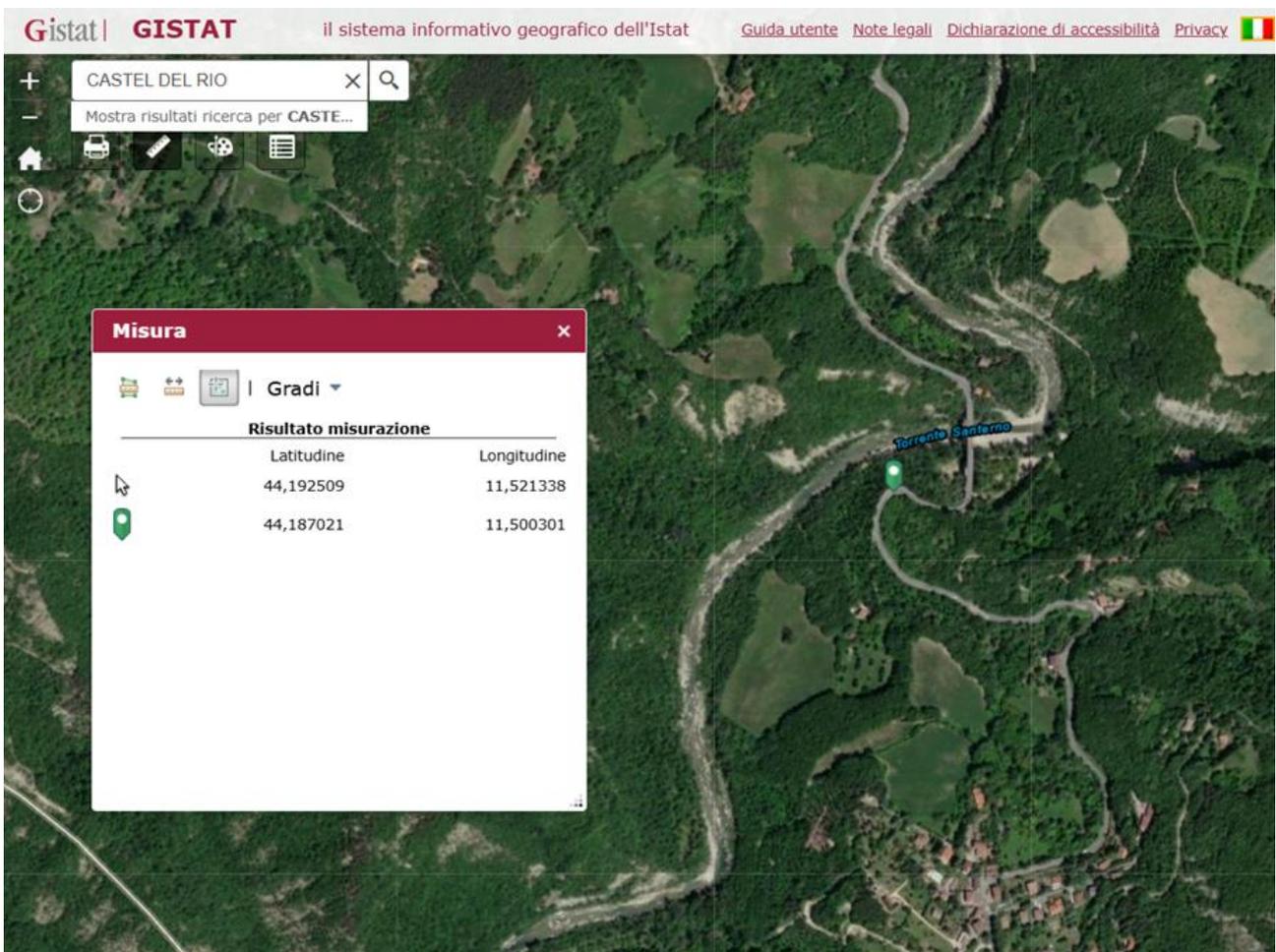


Figura 4 - Coordinate di riferimento (da sistema informativo geografico dell'ISTAT)

Dal punto di vista geografico, il sito è collocato nell'Alta Valle del Santerno, una regione contraddistinta da un paesaggio collinare e montuoso, con altitudini variabili tra i 200 e i 1000 metri sul livello del mare. Il territorio si estende lungo il confine tra le regioni Emilia-Romagna e Toscana, rappresentando una zona di transizione tra il versante adriatico e quello tirrenico dell'Appennino settentrionale. La morfologia del territorio è prevalentemente montuosa, con versanti ripidi e valli profondamente scolpite dall'azione erosiva del fiume Santerno e dei suoi affluenti.

L'area di intervento è la porzione di tornante della SP 610, lunga circa 70 m, oggi oggetto di un restringimento di carreggiata in seguito al crollo locale del muro di sottoscarpa con conseguente svuotamento del terreno

 CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	Data Maggio 2025 Rev. 01 Pag. 8/40

sottostante la sede stradale nonché le porzioni limitrofe dove i sopralluoghi hanno messo in evidenza i segni di un cinematismo incipiente.

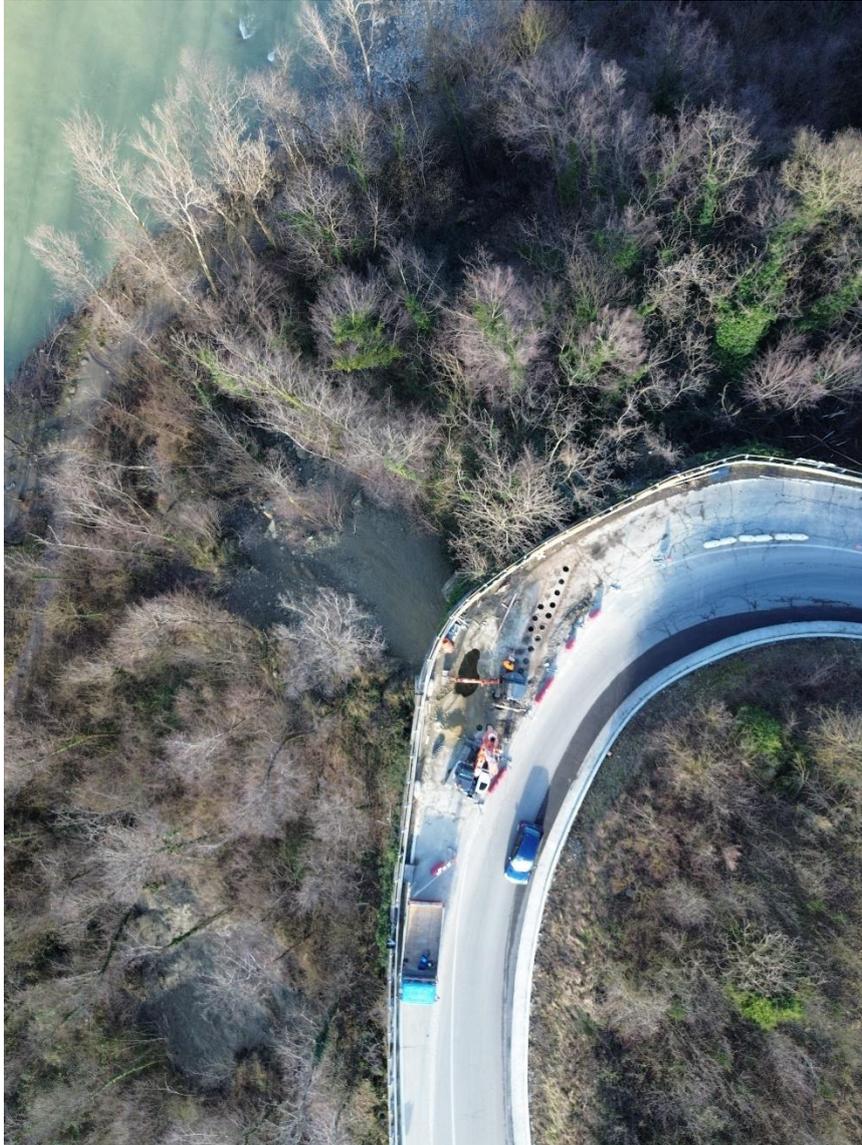


Figura 5 - Area in progetto - tratto di dissesto della sede stradale

3.2 STATO DEI LUOGHI

L'area di intervento è la porzione di tornante della Sp 610, lunga circa 70 m, oggi oggetto di un restringimento di carreggiata in seguito al crollo locale del muro di sottoscarpa con conseguente svuotamento del terreno sottostante la sede stradale nonché le porzioni limitrofe dove i sopralluoghi hanno messo in evidenza i segni di un cinematismo incipiente.

 CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	
	Data	Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 9/40



Figura 6 - Stato dei luoghi nell'area oggetto di intervento

La zona fa parte di un versante con esposizione verso NO, in una porzione di valle molto stretta, con il fiume Santerno che scorre 35 m più in basso e un pendio con inclinazione compresa fra i 30 ed i 40 gradi dove la formazione, caratterizzata da un elevato grado di fratturazione ed alterazione, è coperta da un'abbondante componente terrigena fine residua.

Tutta l'area risulta boscata tranne nelle due porzioni in cui si sono innescate delle frane superficiali con superficie di scorrimento probabilmente collocata fra coltre e formazione alterata più consistente sottostante.

	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	Data Maggio 2025 Rev. 01 Pag. 10/40

4 PRESTAZIONI RICHIESTE ALLE OPERE

I manufatti definitivi devono possedere caratteristiche tali da garantire prestazioni conformi a opere caratterizzate da:

- Vita nominale $V_N = 50$ anni
- Classe d'uso: III (Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV)

	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA		
	RELAZIONE GEOTECNICA		Data Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 11/40	

5 DESCRIZIONE DELLE OPERE, CARATTERISTICHE DEI MATERIALI STRUTTURALI E FASI COSTRUTTIVE

Le opere proposte mirano al conseguimento di tre principali obiettivi:

- il ripristino della sede stradale esistente nella zona del crollo;
- la messa in sicurezza delle porzioni di carreggiata attigue alla zona del crollo, oggetto di fenomeni di scalzamento al piede del muro di sottoscarpa;
- il presidio del versante rispetto allo sviluppo di fenomeni di dissesto superficiale che possano, con evoluzione retrogressiva, andare a scalzare il piede delle nuove opere.

L'intervento in oggetto, finalizzato alla riapertura in sicurezza al traffico della strada su entrambi i sensi di marcia, consiste nella demolizione e ricostruzione del tratto muro dissestato o in procinto di esserlo, realizzandone uno nuovo in calcestruzzo armato fondato su micropali, multi-ancorato, oltre che nella stabilizzazione della scarpata di valle per mezzo di chiodatura.

La peculiarità dell'intervento è la necessità di lavorare in spazi ridotti in quanto, da un lato non è possibile interdire al traffico la corsia di monte della strada (per mancanza di percorsi alternativi), dall'altro non è possibile sfruttare appieno la zona di valle del versante a causa della presenza della scarpata in dissesto, fortemente acclive. L'intervento deve anche tenere conto della presenza della paratia di presidio appena realizzata, il cui progetto è stato curato da altri progettisti.

In ragione del complesso contesto in cui ci si ritrova a operare, la costruzione del muro sarà preceduta dalla realizzazione di una berlinese di micropali, a carattere provvisoria, in corrispondenza del centro della carreggiata, capace di permettere la ricostruzione in sicurezza del muro senza necessità di interdire al traffico la SP610. Fa eccezione la zona dove è presente la paratia di recente realizzazione (2024) dove, in luogo della berlinese, è previsto il potenziamento della paratia stessa.

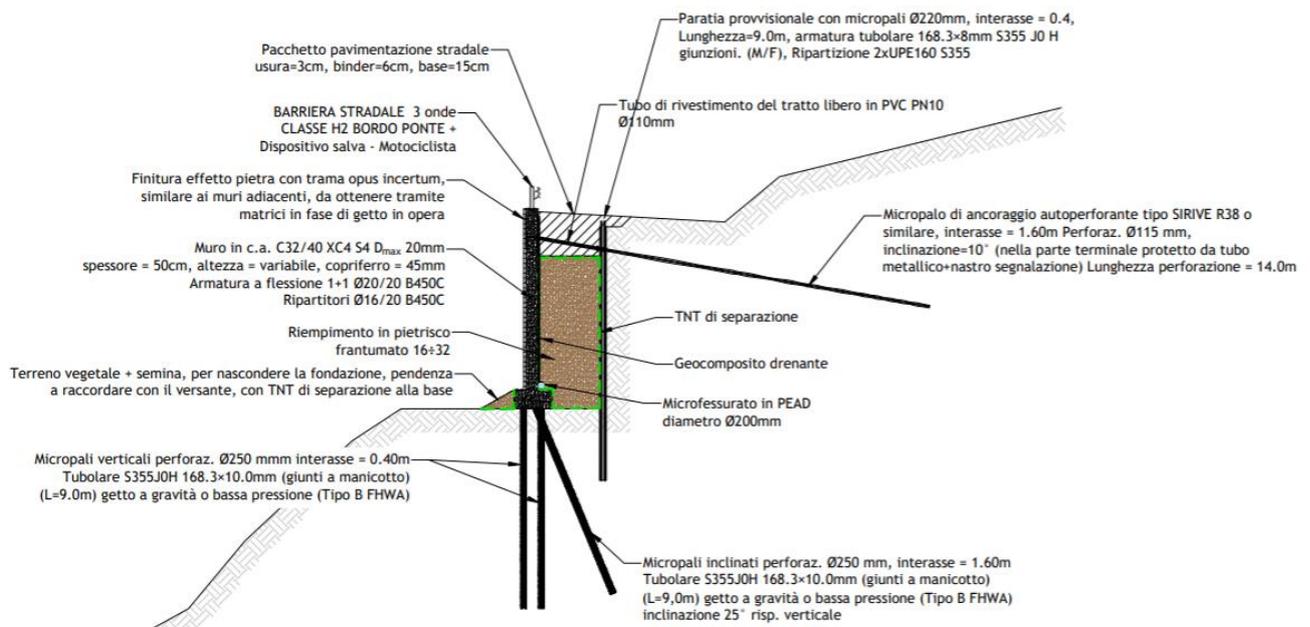


Figura 7 - Geometria e caratteristiche principali dell'opera in progetto

A valle del muro, al fine di scongiurare lo sviluppo di fenomeni di dissesto superficiale analoghi a quelli oggi osservabili, è prevista la realizzazione di un intervento di rinforzo corticale mediante reti metalliche a doppia torsione e funi ancorate con chiodi.

	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA		
	RELAZIONE GEOTECNICA		Data Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 12/40	

6 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA

Rimandando alla Relazione Geologica di progetto (CMDDB-001-PH-TT-201-A) per una descrizione dettagliata degli aspetti geologici, di seguito si riporta un breve inquadramento delle tematiche principali.

6.1 GEOLOGICA LOCALE

L'area di progetto si colloca nella parte settentrionale del Foglio "Marradi" dove al di sotto dei depositi quaternari, vi è la Successione miocenica Umbro-Marchigiano-Romagnola, interessata da una serie di sovrascorrimenti e faglie trascorrenti.

L'area è rappresentata in scala 1:10'000 nella carta geologica della Regione Emilia-Romagna (Figura 8) che individua, in prossimità del sito in oggetto, coperture quaternarie costituite da depositi alluvionali in evoluzione (b_1), conoidi torrentizie inattive (i_2) e depositi di versante (a_3) al di sopra del basamento, costituito dal membro di Dovadola (FMA₁₀) e dal membro di Civitella (FMA₉).

Nel dettaglio, i depositi alluvionali e le conoidi si collocano a valle dell'area di progetto, in corrispondenza dell'alveo del fiume Santerno, mentre il substrato affiorante è rappresentato dal membro di Civitella.

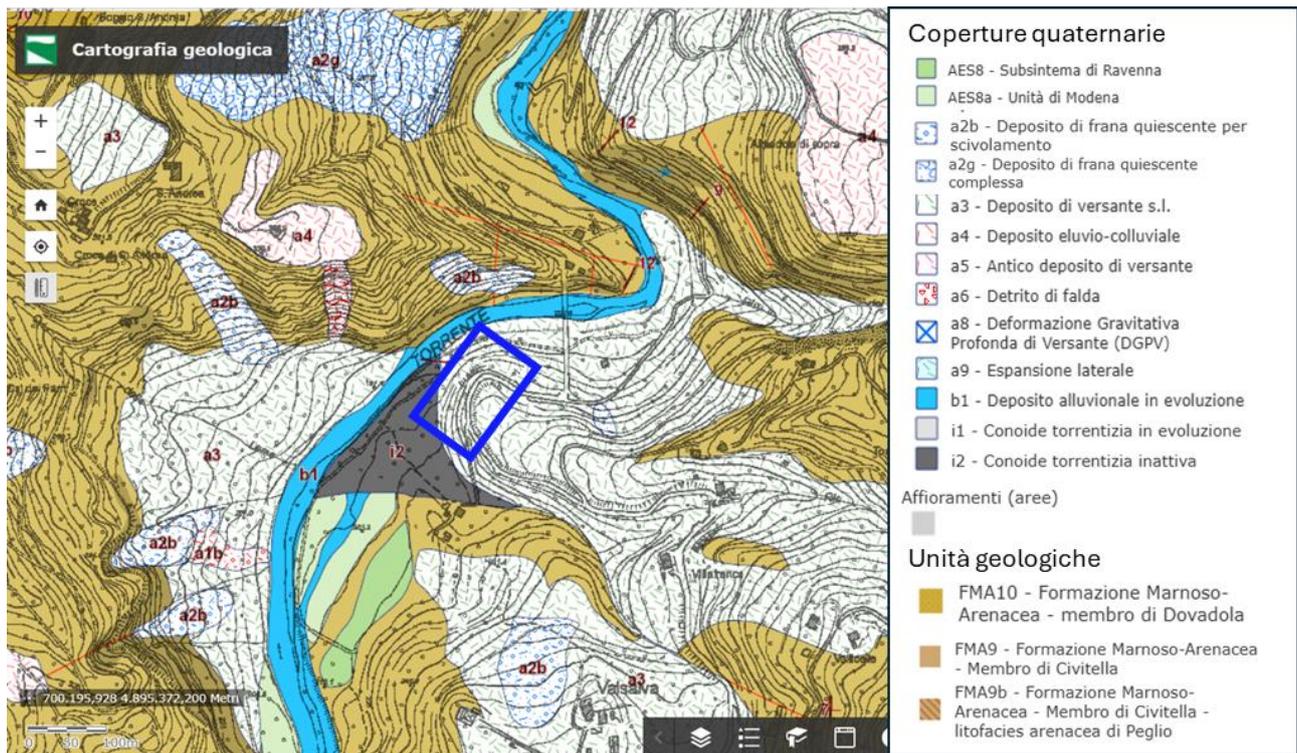


Figura 8 - Carta geologica in scala 1:10'000 della Regione Emilia-Romagna. In blu, l'area di progetto.

6.2 GEOMORFOLOGIA

Dal punto di vista geomorfologico l'area di studio è caratterizzata dalla presenza di estesi depositi di versante, associati a fenomeni di instabilità sia quiescenti che attivi, come evidenziato dalla Carta dell'Inventario dei Fenomeni Franosi della Regione Emilia-Romagna (Figura 9).



Figura 9 - Carta dell'Inventario dei Fenomeni Franosi della Regione Emilia

La zona di intervento ricade su un versante con esposizione verso NO, in una porzione di valle molto stretta, con il fiume Santerno che scorre 35m più in basso e un pendio con inclinazione compresa fra i 30 e i 40 gradi dove la formazione, caratterizzata da un elevato grado di fratturazione e alterazione, è sub-affiorante (Figura 10) e coperta da un'abbondante componente terrigena fine residua.



Figura 10 - Affioramento locale di un orizzonte arenaceo lungo il versante a valle dell'area di intervento

 CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	
	Data	Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 14/40

Tutta l'area risulta boscata, tranne nelle due porzioni in cui si sono innescate delle frane superficiali con superficie di scorrimento probabilmente collocata fra coltre e i depositi più consistenti sottostanti.



Figura 11 - Vista planimetrica dell'area di intervento il 29/01/2025

La frana posizionata più a sud è evoluta nel corso del mese di febbraio, arrivando oggi a scoprire il piede del muro determinandone un cedimento reso evidente dalla fessura di trazione all'interfaccia con la trave porta barriera (Figura 12 - b).



Figura 12 - Fotografie dell'area di intervento il 25/02/2025 (punti di vista nella figura precedente)

Tutti i depositi compresi fra i due fenomeni franosi risultano comunque distaccati dal piede del muro, a riprova di un complessivo scivolamento verso valle dell'area (Figura 12 - a).

	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	
	Data	Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 15/40

6.3 CENNI DI IDRAULICA LOCALE

La dorsale potrebbe essere interessata da una circolazione idrica ipogea al contatto fra il substrato litoide e la copertura detritica durante e dopo i periodi di intense e/o prolungate precipitazioni.

6.4 MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO

L'analisi congiunta dei risultati delle indagini geognostiche eseguite in sito, ha permesso di individuare la seguente successione stratigrafica (Rif. CMDDB-001-DD-REL-201-A):

- **Unità 1** – coltre eluvio-colluviale: costituita da limi e sabbie, a tratti debolmente cementati, con presenza sporadica di clasti. Lo spessore di questa unità è variabile, con una profondità minima di 0.6m da p.c. (S02) e una massima di circa 5m da p.c.;
- **Unità 2** – materiale caotico con matrice limoso-sabbiosa e clasti lapidei spigolosi: associato a detrito di versante. Questa unità si sviluppa tra circa 5m e 13m da p.c., con un passaggio graduale verso l'unità sottostante;
- **Unità 3** – materiale caotico con matrice limoso-argillosa e clasti di arenaria: attribuibile a una coltre di alterazione e degradazione della Formazione Marnoso-Arenacea con un contatto con gli strati sovrastanti e sottostanti non ben identificabile;
- **Unità 4** – materiale caotico con matrice limoso-argillosa e clasti di arenaria: caratterizzato da valori di resistenza meccanica che incrementano verso il basso. Questa unità è associata a un livello meno alterato e degradato della Formazione Marnoso-Arenacea.

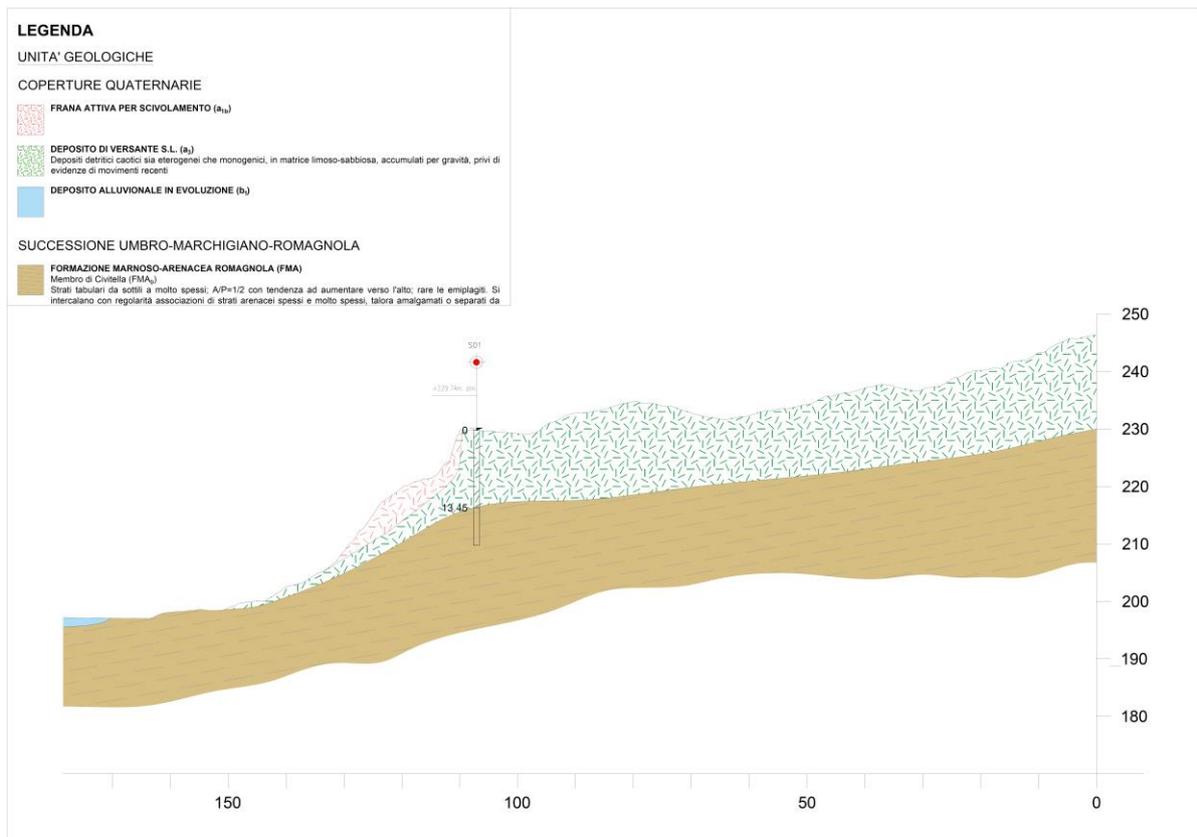


Figura 13 - Sezione geologica realizzata in corrispondenza dell'area di progetto

	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	
	Data	Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 16/40

7 CAMPAGNE D'INDAGINE DISPONIBILI

Di seguito si sintetizzano i dati e i principali risultati delle campagne disponibili sia specificatamente nell'area in progetto sia su materiali appartenenti alla medesima formazione Marnoso-Arenacea su contesti analoghi in aree vicine.

Per la caratterizzazione geotecnica dei litotipi individuati si rimanda ai capitoli successivi.

7.1 CAMPAGNE ESEGUITE NELL'AREA

Per la progettazione geotecnica della paratia provvisoria a protezione della carreggiata interna è stata predisposta una campagna di indagini realizzata a fine 2024 (campagna 2024) che ha previsto la realizzazione di sondaggi, prove penetrometriche leggere DPM e di indagini sismiche secondo la disposizione illustrata in Figura 14.



Figura 14 - Ubicazione delle verticali di indagine eseguite nel corso della campagna 2024

Nell'ambito del presente progetto, al fine di stabilire un quadro sperimentale sufficientemente approfondito per il progetto delle opere, sono stati realizzati specifici rilievi di campagna volti sia a definire il quadro geologico geomorfologico dell'area sintetizzato nella relazione Geologica sia a determinare le caratteristiche geomeccaniche dei materiali che costituiscono coltre e substrato geologico locale, mediante perforazioni a carotaggio continuo nel sottosuolo, indagini di laboratorio e rilievi geofisici di superficie (campagna 2025) secondo la disposizione illustrata in Figura 15.

Infine, la **Banca Dati delle Prove Geognostiche della Regione Emilia-Romagna** mette a disposizione dati sperimentali da tutto il territorio regionale, fra questi sono state scelte le prove eseguite nell'abitato di Rocca San Casciano, distante circa 30km dall'area di interesse, riferite a campioni indisturbati della formazione Marnoso-Arenacea alterata.

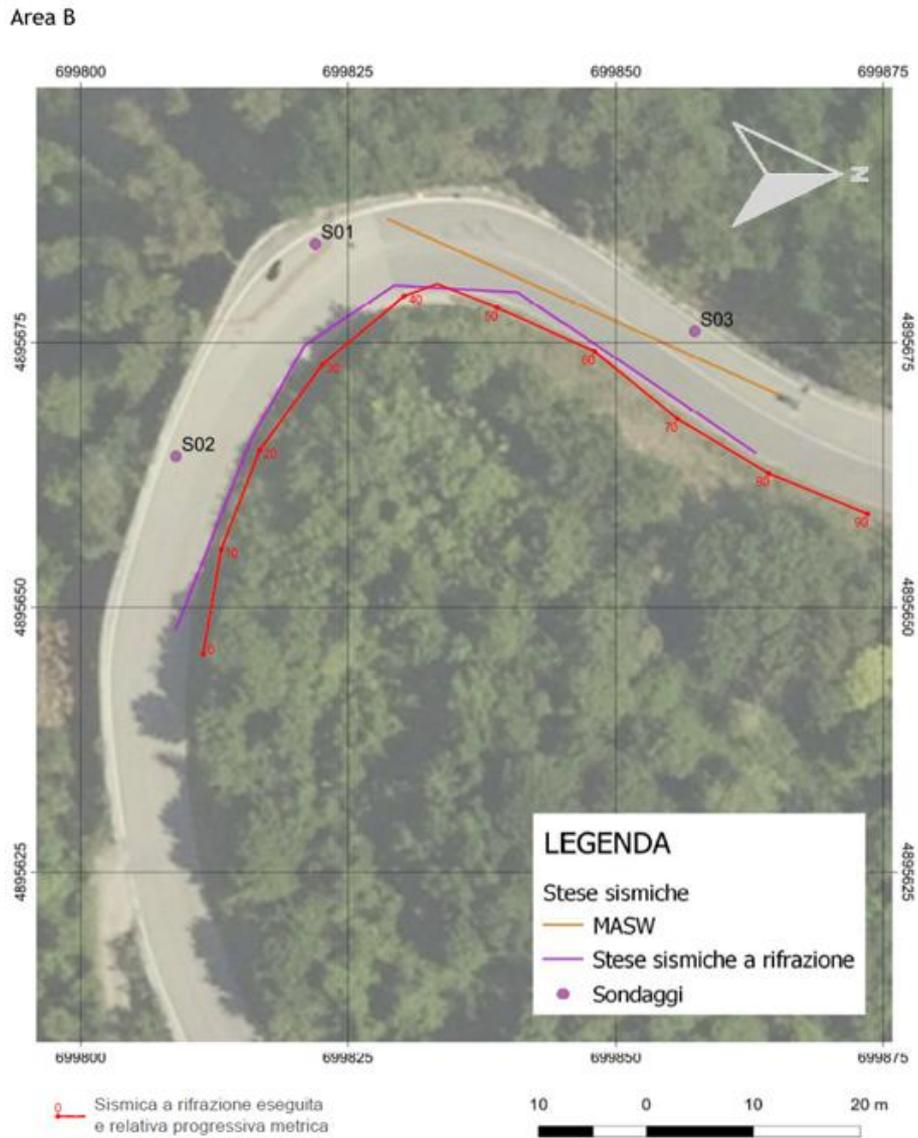


Figura 15 - Ubicazione delle verticali di indagine eseguite nel corso della campagna 2025

 CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA		
	RELAZIONE GEOTECNICA		Data Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 18/40	

7.1.1 Campagna 2024 - "Lavori di Somma Urgenza per il ripristino della sede stradale e delle scarpate di monte e di valle colpiti dagli eventi meteorologici di settembre 2024, lungo la SP 610, "Montanara" nei territori di Imola, Fontanelice, Casalfiumanese, Borgo Tossignano a Castel del Rio"

Nel corso della campagna 2024 sono stati realizzati:

- n. 2 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, della lunghezza totale di 18 metri lineari (S1 ed S2);
- n. 36 prove Tor Vane e n°36 prove con penetrometro tascabile su carota;
- n. 1 prospezioni sismiche passive a stazione singola (HVS1);
- n. 5 prove penetrometriche dinamiche medie (DPM1 – DPM5);

La documentazione delle indagini reperite è riportata nell'elaborato "E130 – Relazione geotecnica e strutturale".

I sondaggi realizzati lungo l'asse viario hanno evidenziato, sotto il pacchetto stradale, uno strato di coltre di copertura da moderatamente a mediamente consistente fino a 7m di profondità (valori di Pocket penetrometer > 3.0kg/cmq).

Al di sotto di questo livello, il sondaggio riporta uno strato di arenaria ben cementata della Formazione della Marnoso-Arenacea.

SONDAGGIO n° 1		Attrezzatura: EK 2005 Elettrici Sistema di perforazione: Rotazione secco								
		Carotieri: semplice diam. 101 mm; rivest. diam. 127 mm ML __								
PROF. DAL P.C.	SPESSORE STRATO	STRATIG.	CAMPIONE QUOTA P.C.	DESCRIZIONE	REC	S.P.T.	PERCENTUALE CAROTTAGGIO	PENETROM. TASCABILE (Kg/cmq)	TORVANE (Kg/cmq)	FALDA
1.00	1.10			ASFALTO MANTO DI USURA SPESSORE CIRCA 10 CM CON AL DI SOTTO STABILIZZATO CON CLASTI ARENITICI E CALCAREI FINO AD 1.10 metri DA P.C.	100%					
2.00				LIMI SABBIOSI CON RARI CLASTI MM E RARAMENTE DCM DI NATURA ARENITICA. COLORE DA GRIGIO CHIARO A GIALLASTRO CON ZONATURE OCRA IN CORRISPONDENZA DI LENTI FRANGEMENTE SABBIOSE. RARE LENTI LIMOSO ARGILLOSE GRIGIE CENTIMETRICHE. TERRENI DA CONSISTENTI A MOLTO CONSISTENTI.	100%			3.5	0.9	
3.00			3.5			0.9				
4.00	5.90		3.5			0.9				
5.00			3.0			0.8				
6.00			3.0			0.7				
7.00			3.5			0.9				
8.00			3.0			0.7				
8.50			3.5			0.9				
9.00	1.60		3.0			0.7				
			3.0			0.7				
			3.5	0.8						
			3.5	0.8						
			3.5	0.7						
			2.0	0.5						
										- 7.0 m

Figura 16 - Campagna 2024. Sondaggio S1

 CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	
	Data	Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 19/40

SONDAGGIO n° 2		Attrezzatura: EK 2005 Ellettari		Sistema di perforazione: Rotazione secco		Carotieri: semplice diam. 101 mm; rivest. diam. 127 mm ML __		PERCENTUALE CAROTTAGGIO	PENETROM. TASCABILE (Kg/cmq)	TORVANE (Kg/cmq)	FALDA
PROF. DAL P.C.	SPESSORE STRATO	STRATIG.	CAMPIONE QUOTA P.C.	DESCRIZIONE	REC	S.P.T.	50				
1.00	1.50			ASFALTO MANTO DI USURA SPESSORE CIRCA 10 CM CON AL DI SOTTO STABILIZZATO CON CLASTI ARENITICI E CALCAREI FINO AD 1.50 metri DA P.C.	100%						- NO m
1.50				LIMI SABBIOSI CON RARI CLASTI MM E RARAMENTE DCM DI NATURA ARENITICA. COLORE DA GRIGIO CHIARO A GIALLASTRO CON ZONATURE OCRA IN CORRISPONDENZA DI LENTI FRANGEMENTE SABBIOSE. RARE LENTI LIMOSO ARGILLOSE GRIGIE CENTIMETRICHE. TERRENI DA CONSISTENTI A MOLTO CONSISTENTI.	100%			3.0	0.7		
2.00								3.5	0.7		
3.00								3.5	0.9		
4.00	5.80							3.0	0.7		
5.00								4.5	1.2		
6.00								4.0	1.2		
7.00								4.5	1.3		
7.30								3.0	0.6		
8.00	1.30			STRATI ARENITICI ALTERNANTI A SUBORDINATI STRATI MARNOSI DI COLORE DA GIALLASTRO. VISIBILE STRATIFICAZIONE SUBORIZZONTALE. TERRENI CEMENTATI CAROTABILI CON CIRCOLAZIONE DI ACQUA. SUBSTRATO FORMAZIONALE MARNOSO.ARENAEA.	100%			3.5	0.8		
8.60								3.5	0.8		
								3.0	0.7		
								3.5	0.9		
								3.0	0.7		
								2.5	0.5		

Figura 17 - Campagna 2024. Sondaggio S2

I valori della resistenza non drenata determinabili dalle prove Tor Vane variano, per lo strato di coltre, fra 70kPa e 130 kPa.

Le prove penetrometriche leggere realizzate a monte del tornante indicano la presenza della formazione (o, comunque, di livelli compatti litoidi) a circa 2m da p.c. (

7.1.2 Campagna 2025 - Interventi urgenti di ripristino dissesti SP610

Nel corso della campagna 2025 sono stati realizzati:

- n. 3 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, per complessivi 70 metri lineari di perforazione (S01, S02 e S03);
- n. 33 prove SPT in foro;
- prelievo di n.14 campioni indisturbati sottoposti ad analisi di laboratorio geotecnico.
- n. 1 prospezioni sismiche a rifrazione della lunghezza totale di 90 metri lineari;
- n. 1 prospezioni sismiche di superficie MASW per il calcolo delle $V_{s,eq}$;

Per i dettagli di ciascuna campagna di indagini si rimanda agli studi specifici della relativa fase progettuale.

Sono stati eseguiti n°3 sondaggi a carotaggio continuo per le seguenti lunghezze:

- S1 – 20m;
- S2 – 30m;
- S3 – 20m.

All'interno di ciascun sondaggio sono state realizzate prove di tipo prove SPT (Standard Penetration Test) e sono stati prelevati dei campioni da sottoporre a prove di laboratorio per la determinazione delle caratteristiche fisiche, delle proprietà intrinseche e di quelle meccaniche (TD ed ELL).

Sulle carote estratte sono state eseguite prove penetrometriche speditive (pocket penetrometer).

Le stratigrafie di sondaggio, unite alle prospezioni sismiche a rifrazione e le MASW, permettono di definire uno schema stratigrafico per tutto lo sviluppo dell'opera (circa 80m).

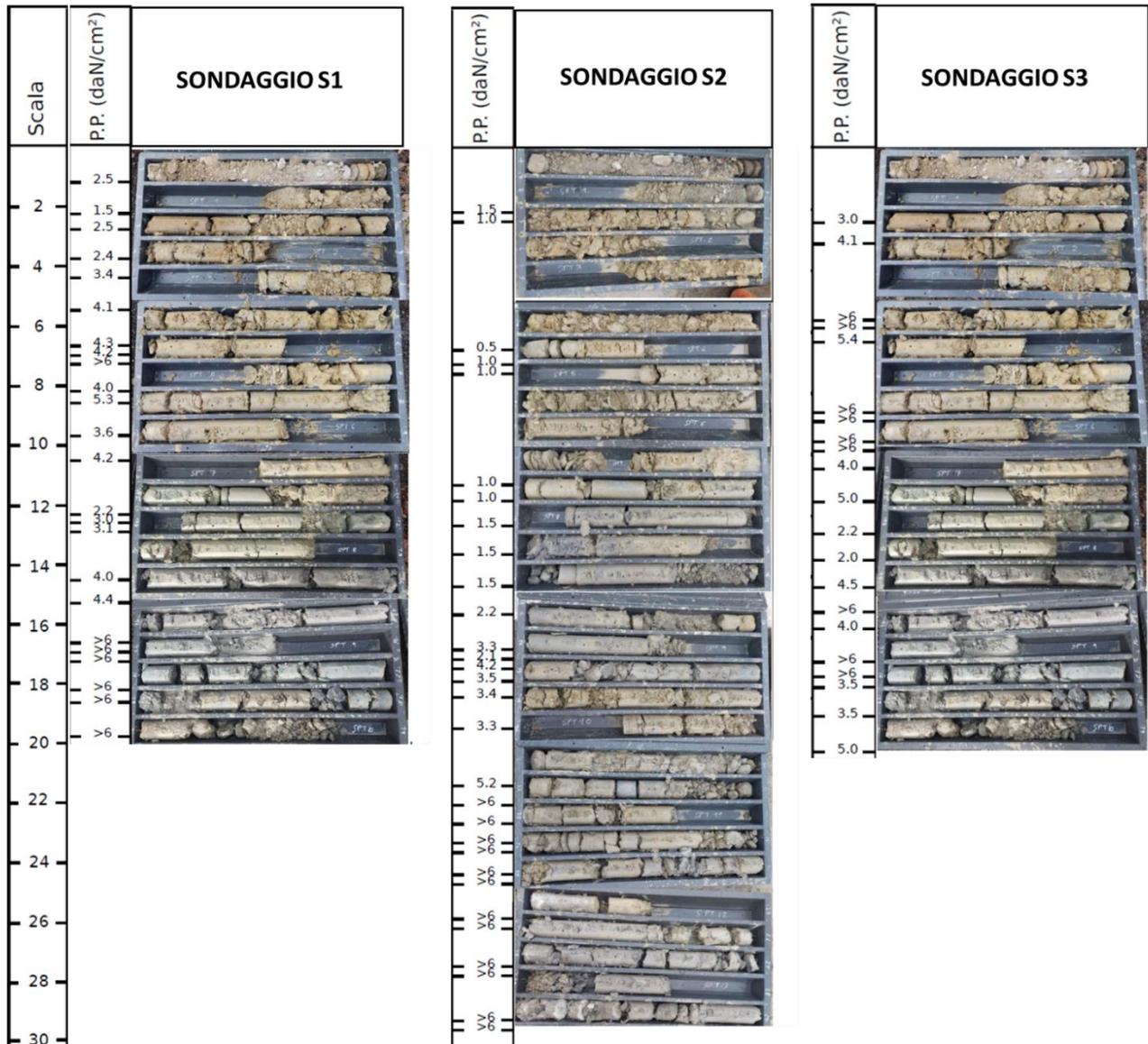


Figura 18 - Campagna di indagine 2025. Fotografie delle cassette di sondaggio

Risulta la presenza di un primo strato di coltre di copertura caratterizzato da scarse proprietà meccaniche ($V_p < 600 \div 1200 \text{m/s}$ e $V_s \approx 220 \text{m/s}$) di spessore compreso fra i 4m e i 10m in corrispondenza della zona del muro crollato, composto *Limo sabbioso a tratti debolmente cementato*; è probabile che si tratti del materiale di riporto del rilevato e associabile al rimaneggiamento della formazione marnosa.

Al di sotto di tale strato si rinviene nei sondaggi, del *Materiale caotico composto da matrice limoso-argillosa grigia chiara e clasti di arenaria con dimensioni variabili da 2-3cm a 50cm di diametro* dotato di caratteristiche meccaniche decisamente migliori ($V_p < 1200 \div 2200 \text{m/s}$) che vanno crescendo con la profondità. Tale materiale si rinviene per uno spessore di 4-8m ($V_s \approx 400 \div 500 \text{m/s}$).

	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA		
	RELAZIONE GEOTECNICA		Data Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 21/40	

A profondità superiori le caratteristiche meccaniche migliorano ulteriormente ($V_s \approx 500\div 600$) pur rimanendo i materiali simili dal punto di vista granulometrico.

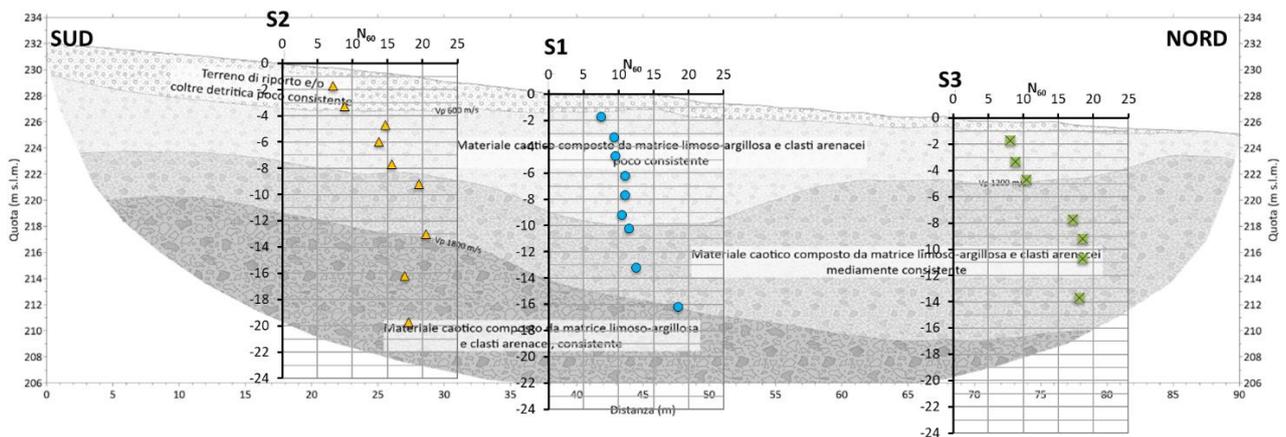


Figura 19 - Schema stratigrafico di sintesi delle indagini

Le velocità delle onde P, inferiori a 1500 m/s nei primi 10m, permettono di collocare al di sotto di questa profondità l'eventuale falda che dunque risulta sostanzialmente esterna al volume di influenza dell'opera. La falda sembrerebbe comunque presente in forma transitoria (durante i periodi di intense o prolungate precipitazioni) solo all'interno delle coltri che interessano il versante.

Il contatto fra le unità è leggermente immergente verso il fiume Santerno.

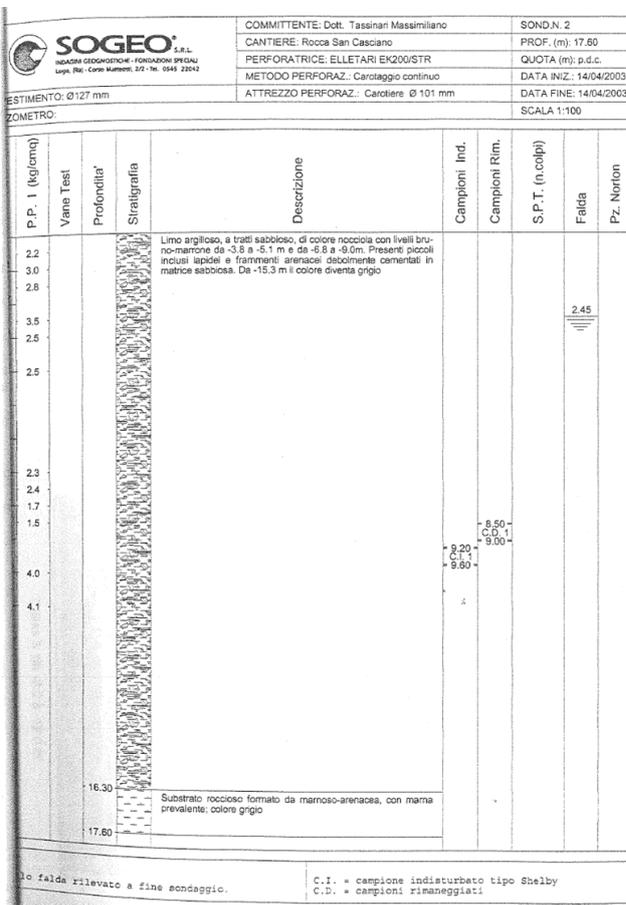
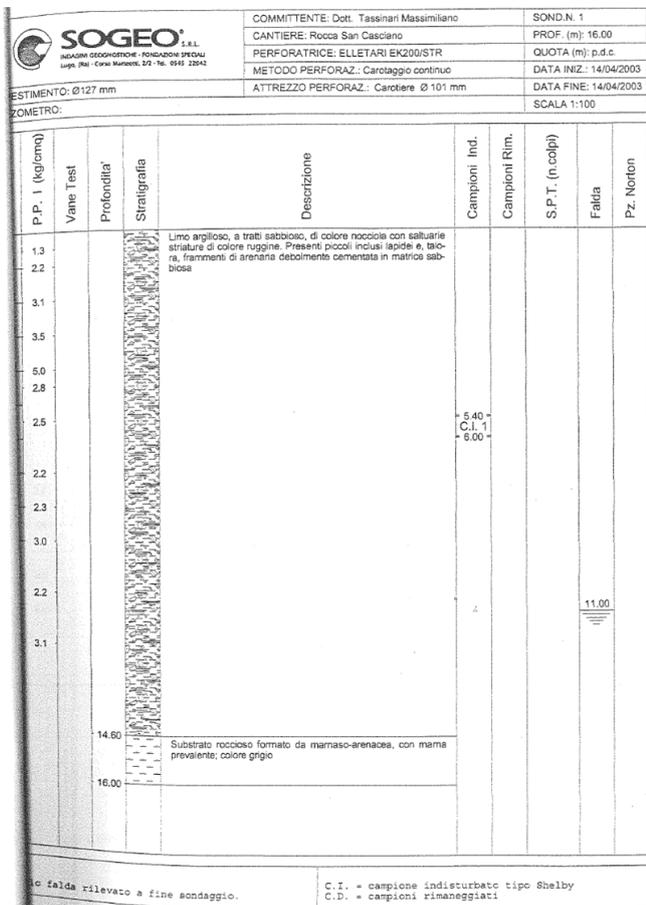
Le quote di esecuzione delle prove in sito, le quote di prelievo dei campioni indisturbati, le modalità esecutive, le caratteristiche tecniche operative e la documentazione delle indagini realizzate sono riportate in allegato alla Relazione Geotecnica di progetto.

7.2 INDAGINI SUI MATERIALI CAOTICI PROVENIENTI DALLA FORMAZIONE MARNOSO-ARENACEA ALTERATA

La letteratura relativa ai dati sperimentali sui materiali caotici provenienti dalla formazione Marnoso Arenacea non è vasta, a causa delle considerevoli difficoltà di campionamento indisturbato dei materiali.

Si riportano di seguito le indagini eseguite nell'abitato di Rocca San Casciano distante circa 30km dall'area di interesse.

Le due prove disponibili su campioni indisturbati fanno riferimento a materiale aventi caratteristiche del tutto simili a quelle dei materiali caotici appartenenti alla formazione marnoso argillosa, sia in termini di descrizione visiva (*limo argilloso a tratti sabbioso, di colore nocciola ... presenti piccoli inclusi lapidei e frammenti arenacei debolmente cementati in matrice sabbiosa*) che di velocità delle onde sismiche ($V_s \approx 400\div 500\text{m/s}$), che di resistenza penetrometrica (pocket penetrometer $3\div 6\text{ kg/cm}^2$).



Comune di Rocca S. Casciano

CODICE LAVORO - 1255

VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO

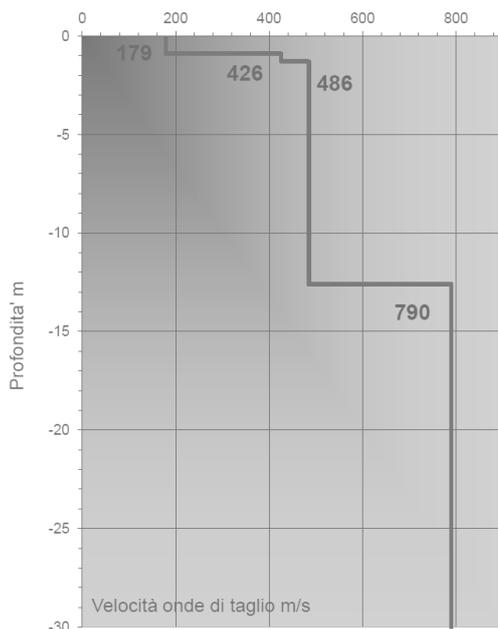


Figura 20 - Sondaggi e MASW eseguite sui materiali caotici provenienti dalla formazione Marnoso-Arenacea

	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	
	Data	Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 23/40

8 CRITERI DI CARATTERIZZAZIONE

8.1 CONSIDERAZIONI CIRCA I CRITERI DI CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA ADOTTATI

Le indagini realizzate nell'area hanno compreso l'esecuzione sia di prove in sito (prove penetrometriche dinamiche SPT, prove speditive sulle carote con penetrometro tascabile) e prove geofisiche tipo MASW e sismica a rifrazione che di prove di laboratorio.

La natura dei materiali, eterogenei e caratterizzati da una prevalente matrice limosa ma con rilevante componente granulare grossolana, che in alcuni casi diviene prevalente, determina alcune criticità nella corretta esecuzione delle prove e di conseguenza nella interpretazione meccanica delle caratteristiche dei materiali.

8.1.1 Criticità legate all'interpretazione da prove in sito

Le prove SPT, misurando l'energia dinamica necessaria a far avanzare la punta, consentono di individuare abbastanza agevolmente il passaggio fra le unità geotecniche a differente consistenza meccanica; tuttavia, il loro impiego nella determinazione delle caratteristiche meccanica dei terreni è adatto ai soli terreni granulari sciolti. Quando si è in presenza di terreni a matrice fine i risultati ottenuti potrebbero essere fuorvianti.

A loro volta le prove penetrometriche speditive (PP), finalizzate a determinare la resistenza non drenata su terreni a grana fine, offrono determinazioni realistiche su argille di bassa/media consistenza ma non possono essere eseguite su terreni granulari per i quali è impossibile ottenere carote di sondaggio.

Sui sondaggi realizzati per la campagna 2025 sono state effettuate entrambe le determinazioni a riprova della diffusa presenza della matrice fine; pertanto, le prove SPT non potranno essere impiegate nella determinazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali.

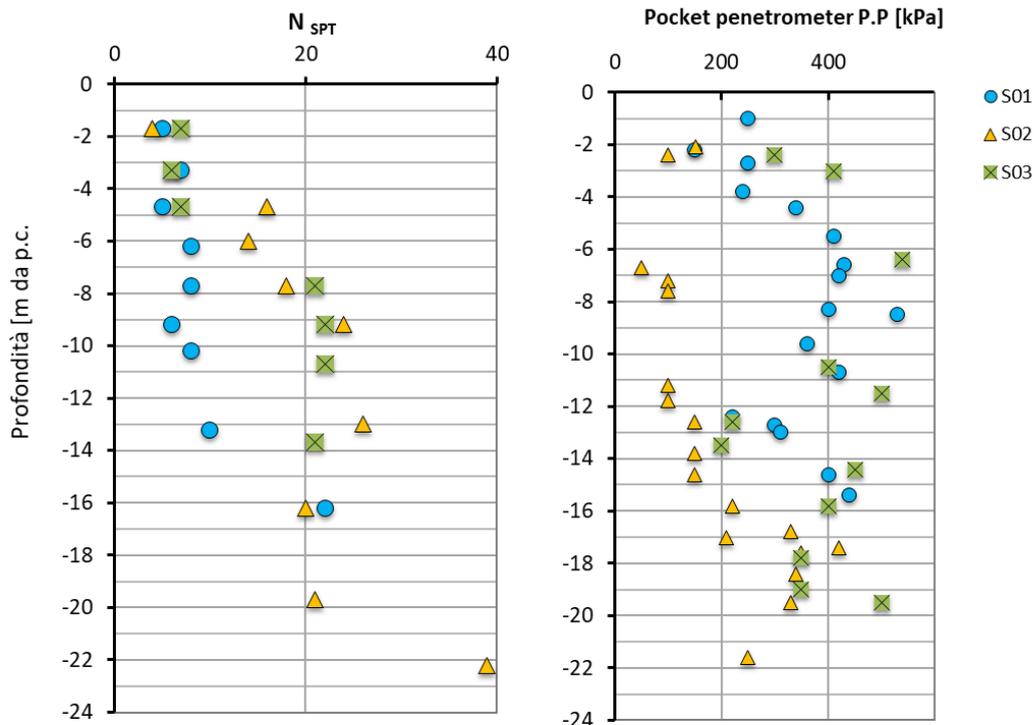


Figura 21 - Confronto fra profili di resistenza registrati sulle medesime verticali fra la prova penetrometrica dinamica SPT e la prova penetrometrica speditiva (Pocket Penetrometer)

 CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA		
	RELAZIONE GEOTECNICA		Data Maggio 2025
			Rev. 01 Pag. 24/40

8.1.2 Criticità legate all'interpretazione da prove in laboratorio

Per i materiali oggetto di studio, costituiti da una matrice fine con inclusi a granulometria eterogenea, le operazioni di recupero dei campioni mediante fustella producono un disturbo tale da alterare la struttura del materiale e ciò determina, per tutti i campioni della campagna 2025, una qualità di campionamento sempre mediocre (Q3).

Caratteristiche geotecniche determinabili		Costituzione		Proprietà fisiche		Proprietà meccaniche	
		AGI	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
		EC7	C		B		A
Profilo stratigrafico			*	*	*	*	*
Composizione granulometrica				*	*	*	*
Contenuto d'acqua naturale				*	*	*	*
Peso dell'unità di volume					*	*	*
Caratteristiche meccaniche						*	*
		Campioni rimaneggiati			A disturbo limitato	indisturbati	

Figura 22 - Qualità dei campioni prelevati e relative caratteristiche meccaniche determinabili. AGI (1977) e EC7 (1997)

I campioni di qualità Q3 vanno considerati affidabili limitatamente alle proprietà fisiche e poco rappresentativi delle reali caratteristiche meccaniche del terreno per quanto riguarda, per lo meno, le unità geotecniche poco o per nulla rimaneggiate riconducibili alla formazione Marnoso-Arenacea.

La presente caratterizzazione discende dunque da:

- prove di laboratorio eseguite sui campioni rimaneggiati prelevati nel corso dei sondaggi;
- prove di laboratorio eseguite su campioni intatti appartenenti alla stessa formazione in zone limitrofe;
- risultati delle prospezioni sismiche di superficie MASW per la determinazione delle V_s ;
- valori suggeriti in letteratura.

8.2 METODOLOGIA DI ANALISI DEI RISULTATI

8.2.1 Classificazione

La classificazione dei terreni è stata effettuata in modo convenzionale facendo riferimento ai risultati delle prove di laboratorio, eseguite sui campioni esaminati, in termini di:

- caratteristiche fisiche: peso di volume naturale e secco; contenuto naturale d'acqua; grado di saturazione, indice dei vuoti iniziale;
- caratteristiche di classificazione: limiti di Atterberg (limite liquido e limite plastico), analisi granulometrica mediante setacciatura.

8.2.2 Determinazione delle caratteristiche di resistenza in termini di sforzi efficaci

I parametri di resistenza in termini di sforzi efficaci sono stati determinati sulla base dei risultati delle prove di taglio diretto (TD).

 CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	Data Maggio 2025 Rev. 01 Pag. 25/40

8.2.3 Determinazione delle caratteristiche di resistenza in termini di sforzi totali (terreni a grana fine)

Pocket penetrometer

Questa prova è utile per determinare la resistenza non drenata su argille di bassa/media consistenza. La prova consiste nell'infingere sulla parete accuratamente pulita della carota di terreno estratta, un punzone cilindrico di area nota per una profondità fissa. La pressione necessaria a produrre la prima rottura del terreno è legata alla resistenza non drenata.

Correlazioni empiriche con VS

È possibile stimare la resistenza non drenata del materiale a matrice pelitica attraverso correlazioni empiriche con la velocità delle onde di taglio misurata ad esempio utilizzando le correlazioni empiriche proposte da Moon et al. (2016):

$$c_u = 0,006 \cdot V_s^{1.552} \cdot I_p^{0.347}$$

dove

I_p = indice di plasticità

8.2.4 Determinazione delle caratteristiche di deformabilità

Moduli a basse deformazioni e moduli "operativi" sulla base delle prove geofisiche

Le prove geofisiche permettono di definire i profili di velocità di propagazione delle onde di compressione (onde P) e/o di taglio (onde S), misurando il tempo necessario a percorrere una distanza nota.

I risultati si rappresentano sotto forma di diagrammi di velocità in funzione della profondità. Indicando con V_p e V_s rispettivamente la velocità delle onde longitudinali e trasversali e con ρ la massa volumica del materiale, è possibile calcolare:

ν_{dyn} : coefficiente di Poisson dinamico

G_0 : modulo elastico trasversale dinamico:

E_0 : modulo elastico longitudinale dinamico

In un mezzo poroso saturo la velocità delle onde di taglio V_s dipende dalla rigidità a piccole deformazioni del mezzo G_0 attraverso le formule:

$$G_0 = V_s^2 \cdot \gamma / g$$

dove:

γ = peso di volume naturale del terreno in kN/m³

g = accelerazione di gravità pari a 9.81 m/sec²

Pertanto, risulta:

$$E_0 = 2 G_0 (1 + \nu)$$

dove:

ν = modulo di Poisson

Infine, utilizzando la relazione proposta da Evison (1956), è possibile valutare il coefficiente di Poisson in funzione dei rapporti di velocità V_p / V_s .

$$\nu_{dyn} = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2 * (V_p/V_s)^2 - 2}$$

Nel caso di ricorso a metodi di calcolo lineari, basati sulla teoria dell'elasticità, è possibile adottare un modulo

dipendente dalle effettive deformazioni deviatoriche indotte nel terreno.

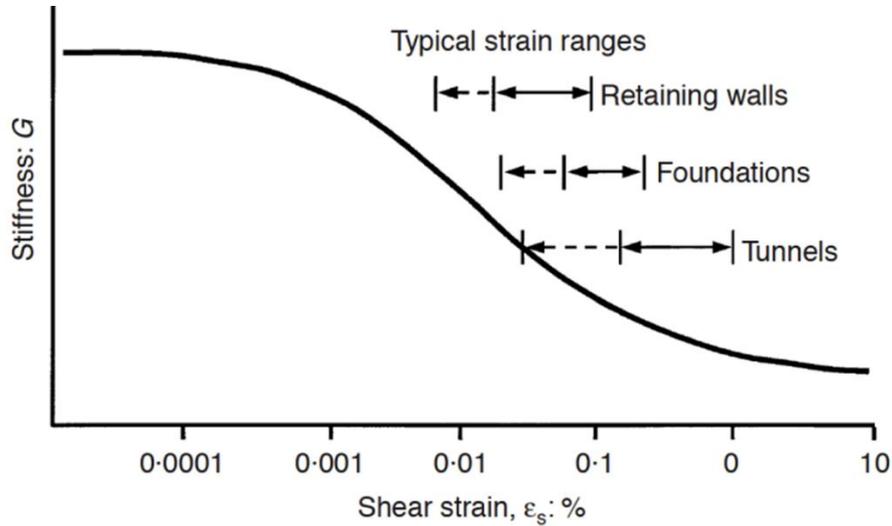


Figura 23 - Curva di decadimento e livelli di deformazione deviatorica tipici delle opere geotecniche (Mair, 1993)

Indicativamente, i moduli operativi possono essere stimati come percentuale dei moduli iniziali, adottando generalmente, per il modulo di deformabilità $E_{0,op}$ il valore $E_0/5$ nei calcoli delle opere di fondazione/sostegno ed $E_0/10$ per il calcolo dei cedimenti dei rilevati.

 CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	
	Data	Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 27/40

9 UNITÀ GEOTECNICHE

9.1 DESCRIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE

Dalla valutazione congiunta delle stratigrafie di sondaggio e delle informazioni desumibili dalle indagini in situ e in laboratorio, ai fini geotecnici sono stati distinti i seguenti tipi di terreno in relazione alle loro litologie, caratteristiche granulometriche, di resistenza al taglio e di deformabilità.

Data la natura eterogenea e difficilmente campionabile dei materiali incontrati, un affidabile riferimento qualitativo per la definizione del loro comportamento meccanico è la classificazione fornita da Poulos che associa i campi di velocità delle onde di taglio alle caratteristiche di consistenza dei materiali.

<i>Material</i>	<i>Shear wave velocity V_s m/s</i>
Very soft soil	85-105
Soft soil	106-135
Medium soil	136-185
Stiff soil	186-275
Very stiff soil	276-365
Soft rock/cemented soil	366-760
Rock	761-1500
Hard rock	>1500
Concrete	2286-2438

Figura 24 - campi di velocità delle onde di taglio che possono essere associati qualitativamente alle caratteristiche di consistenza dei materiali (Poulos)

Al di sotto della coltre di copertura essenzialmente colluviale che interessa i primi 4÷6 metri da p.c., corrispondente a un terreno da mediamente addensato a compatto (*medium/stiff soil*), sono presenti materiali caotici provenienti dalla formazione Marnoso-Arenacea probabilmente disarticolata dai movimenti gravitativi che hanno interessato il versante (cfr.§6.2) con caratteristiche che vanno dai terreni molto consistenti alle rocce soffici (*very stiff soil/soft rock*).

Tali materiali che originariamente erano costituiti dalle sequenze torbiditiche arenitico pelitiche risultano particolarmente sensibili ai fenomeni di degradazione meteorica che ne modificano le proprietà fisico-meccaniche.

L'intensità dei processi di alterazione diminuisce dagli orizzonti più superficiali verso quelli più profondi, pertanto, all'interno dei materiali caotici ricadenti all'interno del volume di influenza dell'opera, vengono distinte due unità geotecniche con differenti caratteristiche meccaniche.

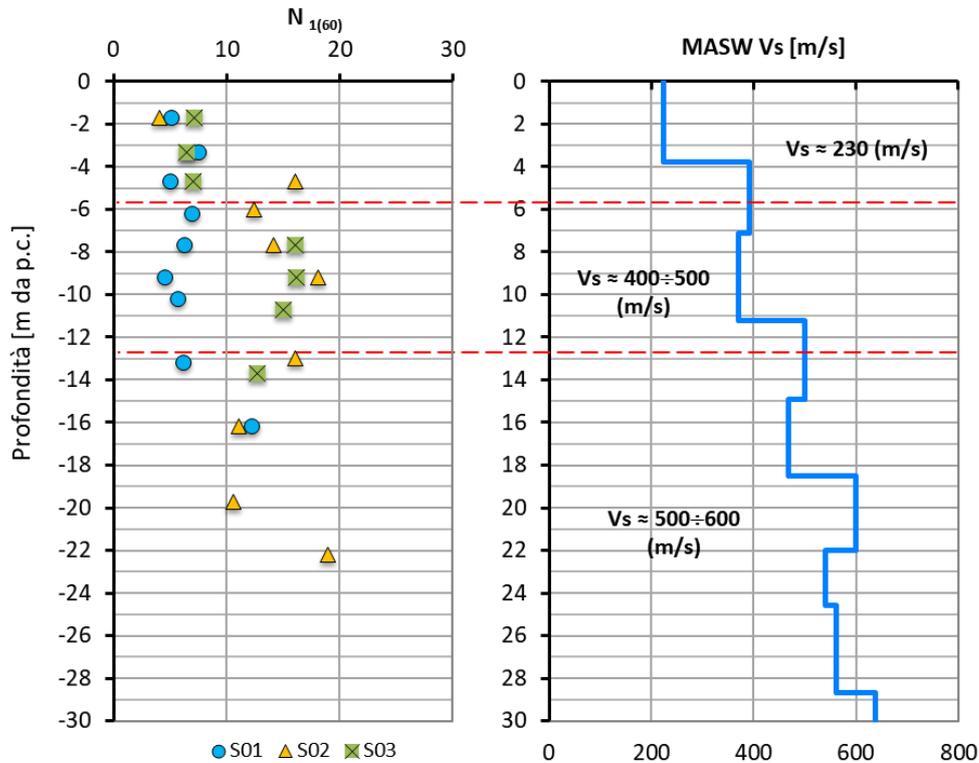
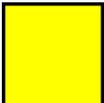
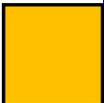


Figura 25 - Campagna di indagine 2025. Confronto MASW vs SPT [$N_{1(60)}$]

Ai fini geotecnici sono pertanto stati individuate tre unità geotecniche pressochè coincidenti con le prime tre unità geologiche definite all'interno del Modello geologico di riferimento illustrato al §6.4:

- 
Ug1 - Coltre di copertura – terreno intercettato dal p.c. composto da limo sabbioso marrone grigio chiaro, a tratti debolmente cementato;
- 
Ug2 – Detrito di versante – materiale caotico prodotto dalla disarticolazione, dall'alterazione e degradazione della Formazione Marnoso-Arenacea;
- 
Ug3 - Formazione alterata – materiale caotico ma più compatto attribuibile a una coltre di alterazione e degradazione della Formazione Marnoso-Arenacea.

9.2 SCHEMA STRATIGRAFICO DI RIFERIMENTO

Lo schema stratigrafico di riferimento per il modello geotecnico viene illustrato in figura seguente.

Lungo il versante a valle dell'opera è osservabile la presenza di coltri detritiche di copertura per altezze <2m (spessore max 1.6m).

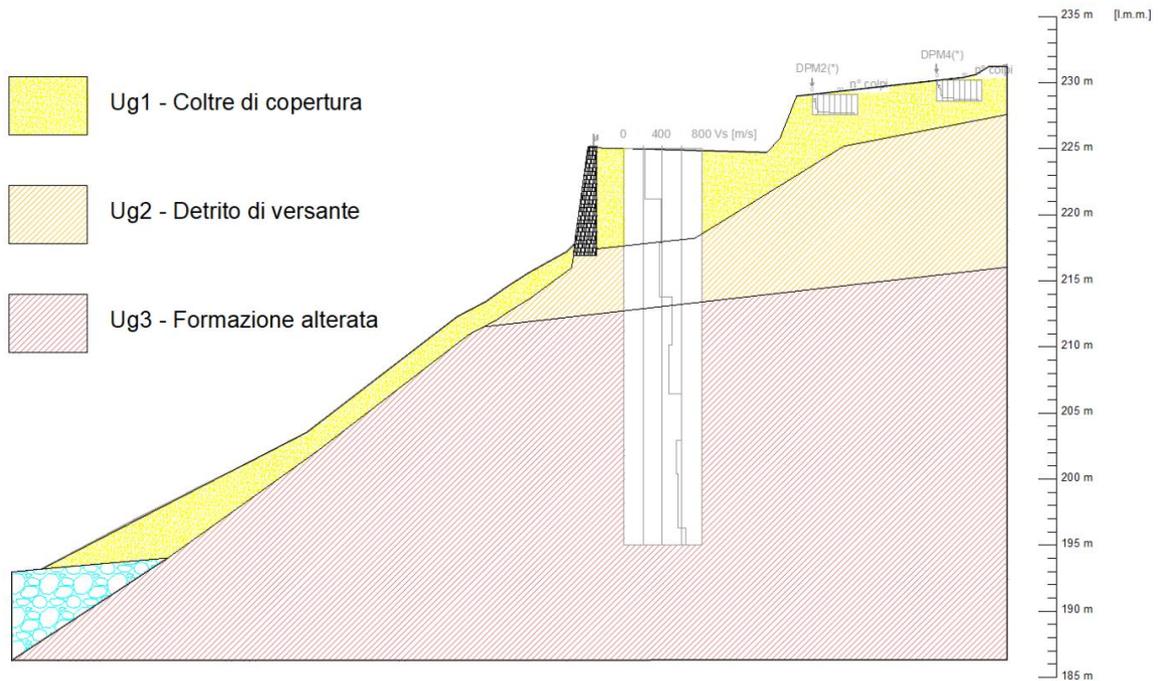


Figura 26 - Schema stratigrafico di riferimento

	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	
	Data	Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 30/40

10 CARATTERIZZAZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE

L'elaborazione delle prove in sito viene presentata prima dei risultati delle prove di laboratorio. In particolare, si procederà illustrando i risultati per ciascuna verticale di indagine per identificare le unità geotecniche presenti. Successivamente si analizzano i risultati delle prove di laboratorio, accorpandoli per unità geotecniche.

10.1 PROVE IN SITO

Nei paragrafi seguenti si riportano, suddivisi nelle unità geotecniche identificate all'inizio del presente capitolo, i risultati e l'interpretazione delle prove eseguite in sito (pocket penetrometer e MASW). Le correlazioni adottate per la stima dei parametri sono quelle indicate al capitolo precedente.

10.1.1 Caratteristiche di resistenza in tensioni totali

Di seguito si riporta un confronto fra la resistenza non drenata determinata mediante penetrometro tascabile (pocket penetrometer) e attraverso correlazioni empiriche con la velocità delle onde di taglio determinata dalla MASW nell'ipotesi di un indice di plasticità pari a 20. Il profilo ottenuto dalla correlazione con le Vs è coerente con i valori di resistenza penetrometrica ottenuti nei sondaggi S01 ed S01 mentre il sondaggio S02 ha valori generalmente inferiori e determinazioni meno frequenti probabilmente a seguito di una maggior frequenza di livelli sabbiosi.

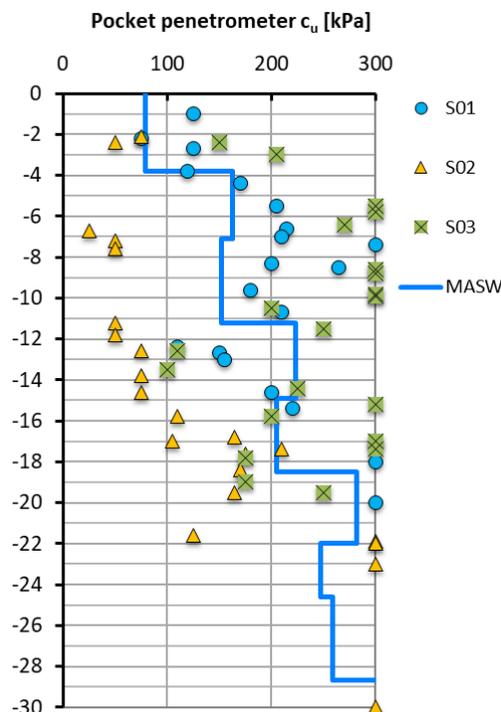


Figura 27 - Confronto fra i valori di c_u da prove con penetrometro tascabile e i valori desunti sulla base di correlazioni empiriche con le velocità delle onde di taglio Vs (Moon et al.; 2016)

Dopo i primi 5 m corrispondenti alla Ug1 in cui la c_u varia dagli 80 ai 150kPa, le resistenze non drenate si attestano attorno fra i 150kPa e i 200kPa per l'Ug2 per crescere fino a circa 300 a profondità superiori ai 12m.

10.1.2 Caratteristiche di deformabilità

Di seguito si riporta l'andamento atteso per i moduli elastici operativi ($E_0/5$ ed $E_0/10$) sulla base delle velocità misurate per le onde di taglio a confronto con i valori cautelativamente scelti per il progetto delle opere:

$$E_d' (Ug1) = 30 \text{ MPa};$$

$$E_d' (Ug2) = 50 \text{ MPa};$$

$$E_d' (Ug3) = 85 \text{ MPa};$$

I valori di progetto E_d' risultano sempre compresi al di sotto dei valori di soglia definiti per i moduli operativi.

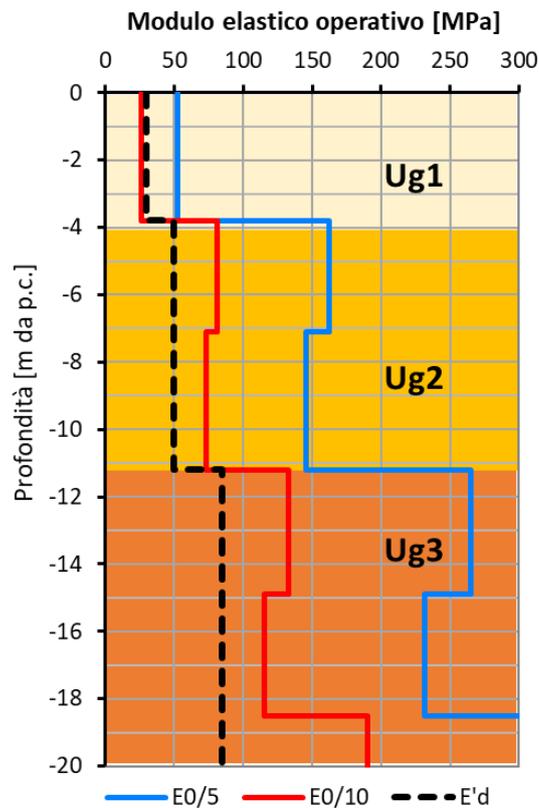


Figura 28 - Moduli elastici "operativi" e moduli di progetto

	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA												
	RELAZIONE GEOTECNICA												Data Maggio 2025
													Rev. 01

10.2 RISULTATI DELLE PROVE DI LABORATORIO

Nella tabella seguente si anticipano i risultati delle caratteristiche fisiche e di classificazione determinate in laboratorio che verranno illustrate successivamente per ciascuna unità geotecnica.

Sondaggio	Campione	Unità	Profondità da p.c.		Quota media CI l.m.m.	Dati generali					Lim. di Atterberg			Granulometria			
						γ_s (kN/m ³)	γ (kN/m ³)	e (-)	W_n (%)	S_r (%)	W_L	W_P	IP	A (%)	L (%)	S (%)	G (%)
			(m)	(m)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(-)	(%)	(%)								
S01	CR1	Ug1	2,5	3,0	-2,8	25,7	18,8	0,66	25,0	76,1	34,9	17,7	17,2	11,4	54,6	33,1	0,9
S01	CR2	Ug1	7,0	7,5	-7,3	25,8	20,2	0,51	19,6	83,7				7,0	35,6	30,0	27,4
S01	CR3	Ug2	11,5	12,0	-11,8	25,2			14,3					11,7	34,4	23,4	30,5
S01	CR4	Ug2	15,0	15,5	-15,3	25,5	21,4	0,45	16,5	97,8	37,0	20,9	16,1	28,6	54,9	13,2	3,3
S02	CR1	Ug1	2,5	3,0	-2,8	25,5					52,6	28,7	23,9	19,6	47,7	23,0	9,7
S02	CR2	Ug1	7,0	7,5	-7,3	26,2					31,4	18,6	12,8	10,4	31,5	40,3	17,8
S02	CR3	Ug2	11,5	12,0	-11,8		19,9				33,5	20,8	12,7	20,0	47,7	14,5	17,7
S02	CR4	Ug2	16,5	17,0	-16,8		20,6	0,49	19,2	91,7	35,1	16,7	18,4	13,7	67,0	12,6	6,4
S02	CR5	Ug3	23,5	24,0	-23,8	26,0	18,8	0,57	13,1	61,1	49,9	26,4	23,5	24,8	37,4	19,6	18,2
S02	CR6	Ug3	26,5	27,0	-26,8	26,3	20,8	0,48	17,9	93,9	38,2	20,7	17,5	13,8	65,0	10,9	10,4
S03	CR1	Ug1	2,5	3,0	-2,8		19,0	0,67	25,0	82,3	32,6	20,4	12,2	16,5	32,3	22,5	28,7
S03	CR2	Ug2	8,5	9,0	-8,8	2,6								17,4	29,1	17,4	36,1
S03	CR3	Ug3	12,0	12,5	-12,3	26,2	20,6	0,50	33,2	95,2	54,2	27,0	27,2	21,5	41,9	21,6	14,9
S03	CR4	Ug3	15,0	15,5	-15,3	25,5	17,8	0,60	23,1	51,2	32,0	17,7	14,3	12,9	31,3	22,5	33,2

Di seguito si riportano, a titolo di confronto, le caratteristiche dei campioni indisturbati prelevati a Rocca San Casciano (2003) in materiali con le medesime caratteristiche della Ug2. È probabile che il prelievo indisturbato sia risultato in questo caso praticabile per la minore presenza di materiale grossolano che ha permesso l'infissione del campionatore a parete sottile.

Sondaggio	Campione	Unità	Profondità da p.c.		Quota media CI l.m.m.	Dati generali					Lim. di Atterberg			Granulometria			
						γ_s (kN/m ³)	γ (kN/m ³)	e (-)	W_n (%)	S_r (%)	W_L	W_P	IP	A (%)	L (%)	S (%)	G (%)
			(m)	(m)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(-)	(%)	(%)								
S1 (2003)	CI1	Ug2	5,4	6,0	-5,7	26,5	20,1	0,55	17,9	87,0	36,0	18,3	17,7	23,0	62,0	13,0	2,0
S2 (2003)	CI2	Ug2	9,2	9,7	-9,5	25,5	19,9	0,60	20,4	91,0	35,2	17,2	18,0	26,0	49,0	24,0	1,0

10.2.1 Ug1 – Coltre di copertura

Caratteristiche fisiche e di classificazione

Le curve granulometriche "spezzate" indicano una composizione piuttosto eterogenea con un "gap" granulometrico generalmente collocato nelle sabbie, andamento tipico dei terreni con elementi lapidei dispersi. La denominazione varia tra "limi sabbiosi ghiaiosi" ai "limi con sabbia debolmente ghiaiosi o argillosi".

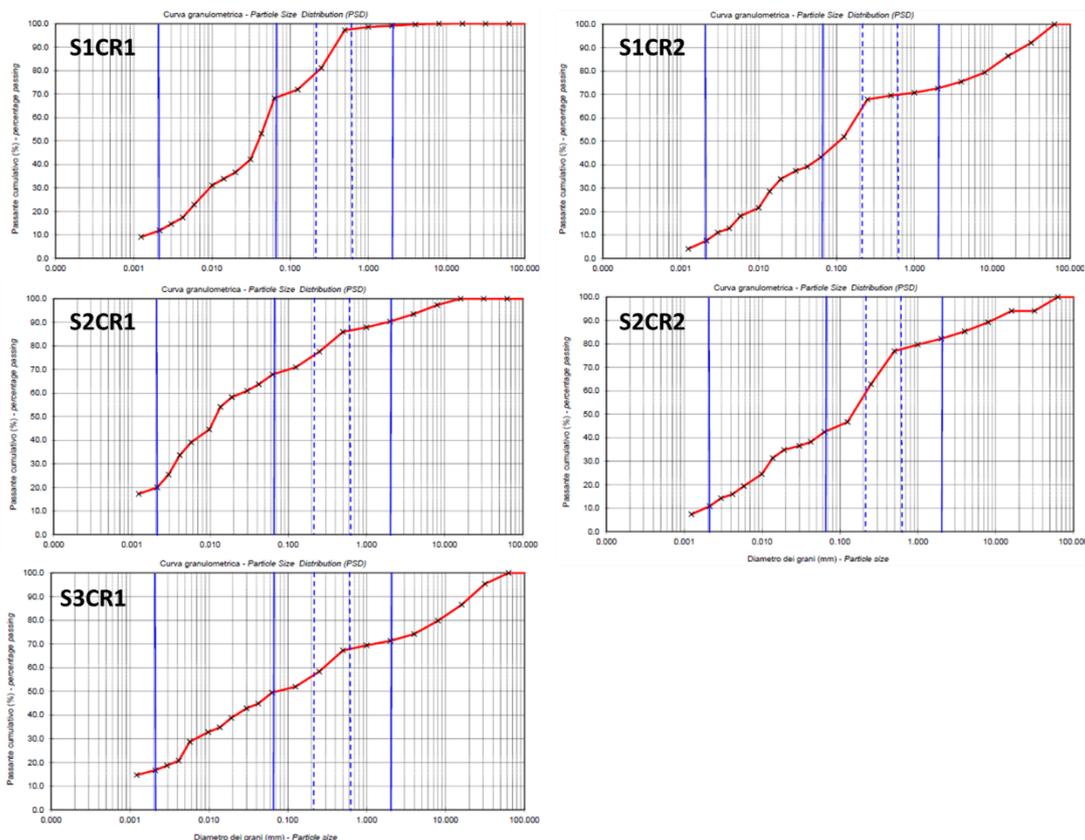


Figura 29 - Unità Ug1. Composizione granulometrica dei campioni rimaneggiati

Peso specifico dei grani e peso dell'unità di volume

Il peso di volume dei grani è $25,8 \text{ kN/m}^3$.

Il peso dell'unità di volume risulta compreso tra $18,8$ e $20,2 \text{ kN/m}^3$. Il valore medio rappresentativo viene assunto pari a 19 kN/m^3 .

Contenuto d'acqua naturale

Il contenuto d'acqua naturale misurato in laboratorio risulta compreso fra minimo $19,6\%$ e massimo 25% . L'indice dei vuoti che risulta compreso tra $0,51$ e $0,67$.

Limiti di Atterberg

Sulla frazione fine dei campioni S1CR1 ed S2CR1 sono stati determinati il limite di liquidità (W_L) ed il limite di plasticità (W_P). Il valore dell'indice di plasticità ($IP = W_L - W_P$) varia da $12,2$ a $17,2$, mentre quelli del limite liquido variano tra 32 e 35 . Sulla carta di plasticità (Figura 30), i punti sperimentali ricadono nel campo delle argille organiche di bassa plasticità.

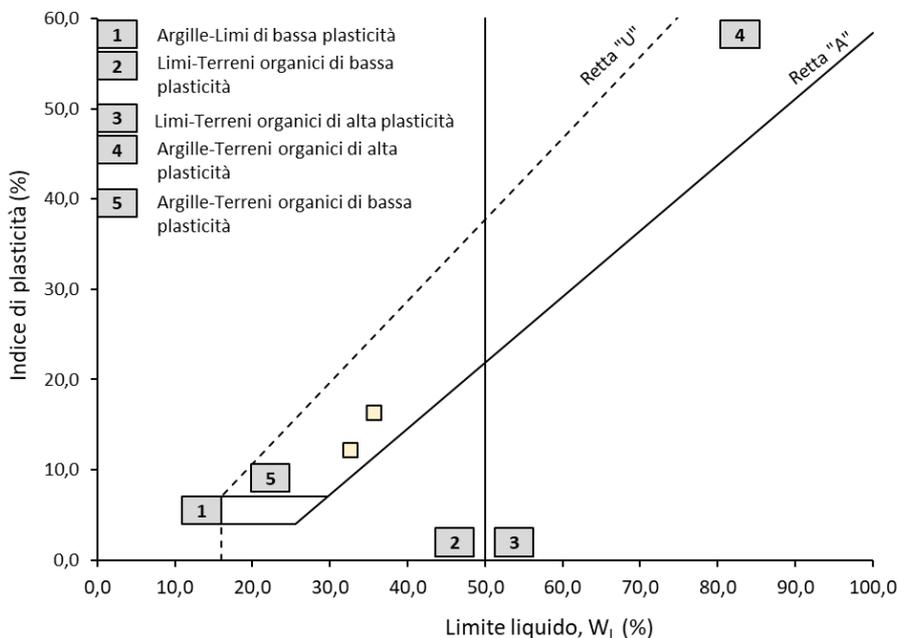


Figura 30 - Unità UG1. Carta di Plasticità di Casagrande

Caratteristiche di resistenza in Tensioni Efficaci

In questo paragrafo i risultati delle prove di resistenza sui terreni appartenenti all'unità Ug1 sono interpretati secondo il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb in termini di tensioni efficaci; i parametri meccanici sono quindi l'angolo di resistenza al taglio ϕ' e la coesione c' .

I risultati delle prove si possono interpolare con un unico involucro, rettilineo, caratterizzato dai seguenti parametri (Figura 31):

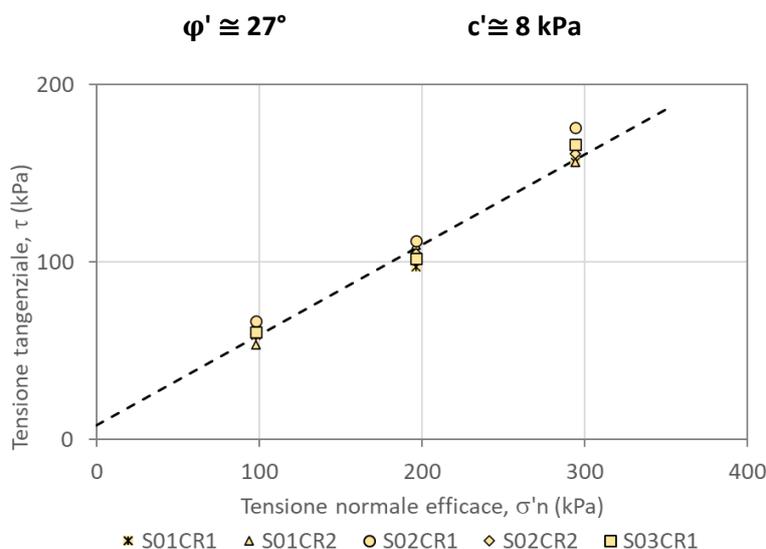


Figura 31 - Unità DF. Involucro di resistenza in tensioni efficaci (da TD)

	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA	
	RELAZIONE GEOTECNICA	
	Data	Maggio 2025
	Rev. 01	Pag. 35/40

L'involuppo proposto appare coerente con le evidenze geomorfologiche riscontrate sul versante dove si verifica il distacco delle porzioni superficiali (sp. $\leq 2\text{m}$) appartenenti alla litologia Ug1 in occasione dell'innalzamento della falda a seguito di eventi meteorici particolarmente intensi. Se si esegue infatti una analisi all'equilibrio limite assegnando alle coltri i parametri meccanici caratteristici (**Figura 32**) il fattore di sicurezza per tali cinematicismi è prossimo all'unità (vedi doc. CMDB-001-DD-REL-204-A – Rinforzo corticale).

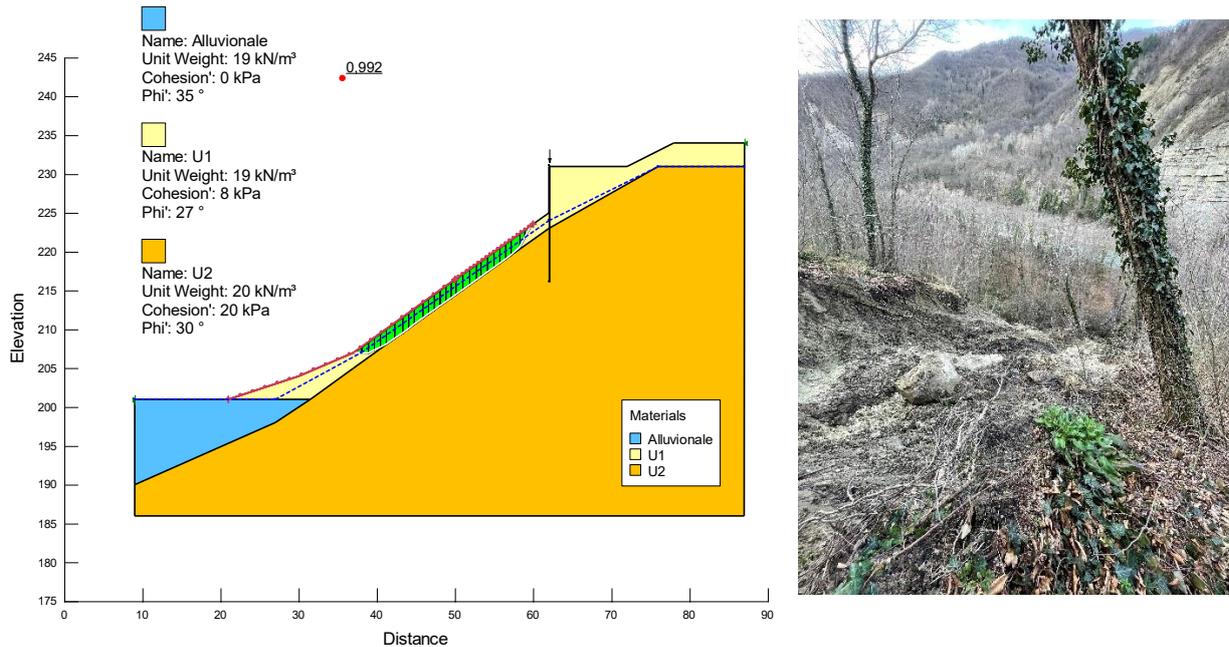


Figura 32 - Analisi a ritroso dei fenomeni di dissesto osservati sulle coltri appartenenti all'unità Ug1

10.2.2 Ug2 – Detrito di versante

Composizione granulometrica

Le curve granulometriche (**Figura 33**) sono anche in questo caso poco "gradate" e mostrano una preponderanza della matrice limosa con talvolta frazioni grossolane importanti riconducibili alla fratturazione dei livelli arenacei (S01CR4 ed S03CR2) che "sbilanciano" la curva.

I terreni variano da "limi argillosi" a "limi ghiaiosi debolmente sabbiosi" alle "ghiaie con limi debolmente sabbiose".

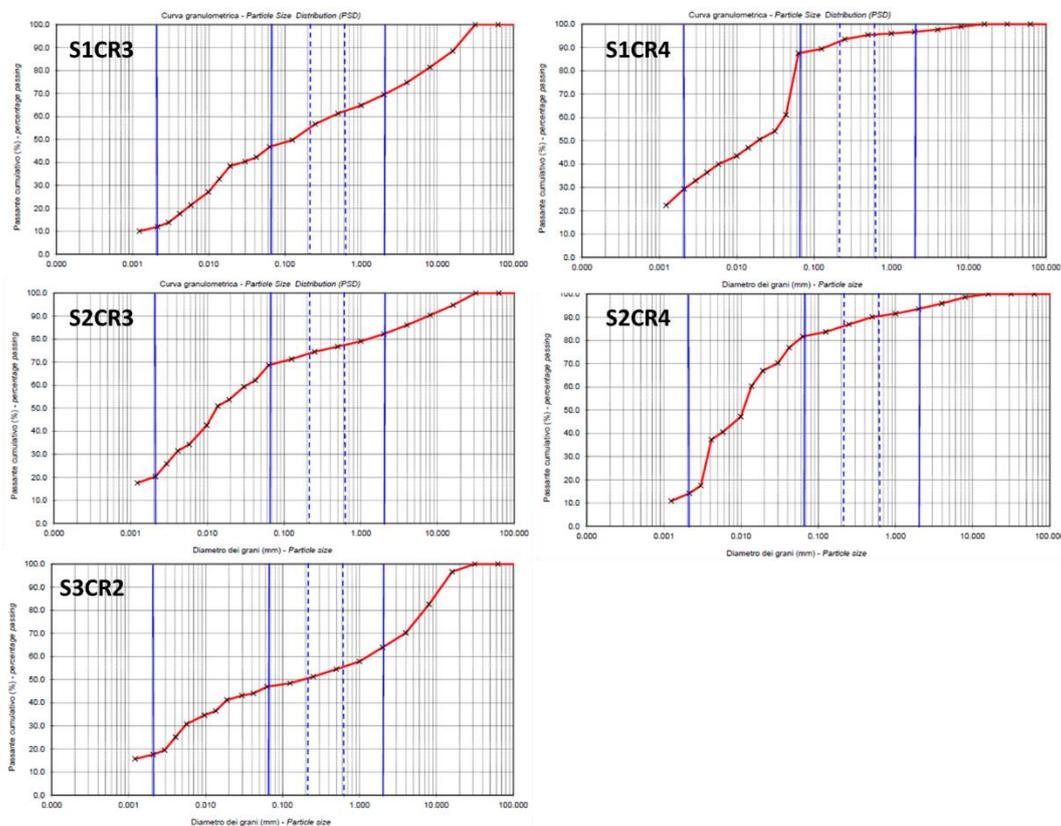


Figura 33 - Unità UG2. Composizione granulometrica dei campioni indisturbati

Peso specifico dei grani e peso dell'unità di volume

Il peso di volume dei grani è compreso tra 25,2 e 26,5 kN/m³.

Il peso dell'unità di volume risulta influenzato dalla presenza di elementi lapidei che determina una variazione tra 19,9 (S02CR3) e 21,4 (S01CR4) kN/m³ per i campioni Q3; i campioni indisturbati (Rocca San Casciano, 2003) si attestano attorno ai 20 kN/m³.

Contenuto d'acqua naturale

Il contenuto d'acqua naturale misurato in laboratorio risulta compreso fra minimo 14,3% (S01CR3) e massimo 20,4 % (campioni indisturbati, 2003). L'indice dei vuoti risulta compreso tra 0,45 e 0,6.

Limiti di Atterberg

Sulla frazione fine dei campioni sono stati determinati il limite di liquidità (W_L) ed il limite di plasticità (W_P). Il valore dell'indice di plasticità ($IP = W_L - W_P$) varia da 12,7 a 18, mentre quelli del limite liquido variano tra 33,5 e 37. Sulla carta di plasticità (Figura 34), i punti sperimentali ricadono nel campo delle argille organiche di bassa plasticità.

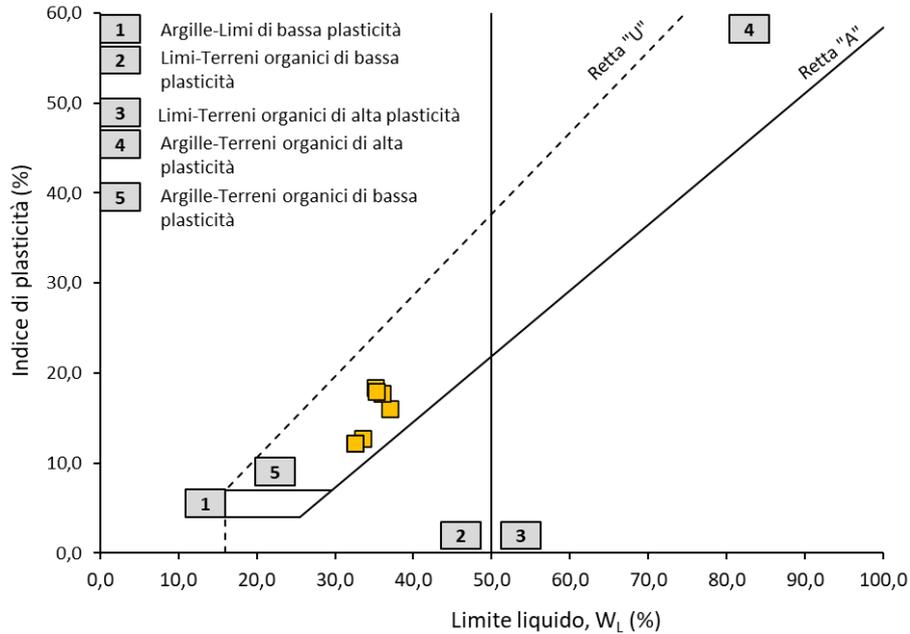


Figura 34 - Unità UG1. Carta di Plasticità di Casagrande

Caratteristiche di resistenza in Tensioni Efficaci

In questo paragrafo i risultati delle prove di resistenza sui terreni appartenenti all'unità Ug2 sono interpretati secondo il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb in termini di tensioni efficaci; i parametri meccanici sono quindi l'angolo di resistenza al taglio ϕ' e la coesione c' . I risultati delle prove di laboratorio sui terreni rimaneggiati (Q3. Campagna 2025) vengono messi a confronto con quelli ottenuti da campioni indisturbati prelevati sui materiali con analoghe caratteristiche prelevati a Rocca San Casciano (2003).

I risultati delle prove si possono interpolare con un unico involucro, rettilineo, caratterizzato dai seguenti parametri (Figura 35):

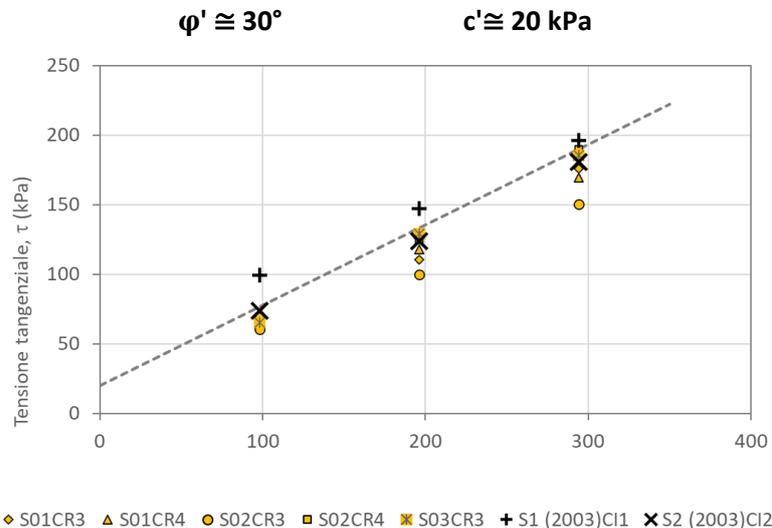


Figura 35 - Unità Ug2. Involucro di resistenza in tensioni efficaci (da TD)

10.2.3 Ug3 – Formazione alterata

Composizione granulometrica

Le curve granulometriche sono simili alle precedenti sia per la presenza della matrice limosa che degli elementi grossolani.

I terreni variano da “limi argillosi” a “limi debolmente sabbiosi e ghiaiosi” alle “ghiaie con limo debolmente sabbiose”.

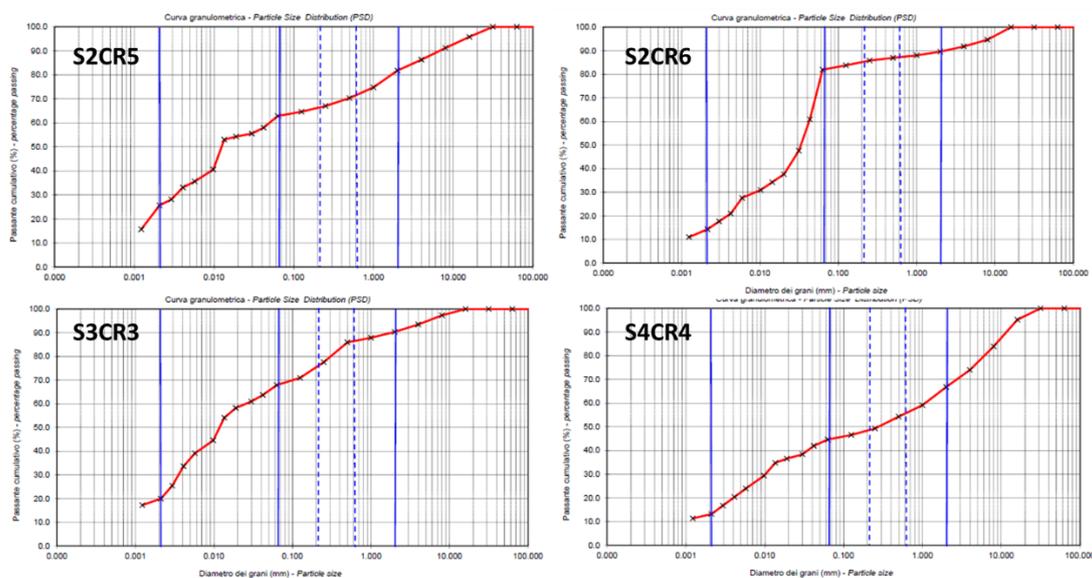


Figura 36 - Unità UG3. Composizione granulometrica dei campioni indisturbati

Peso specifico dei grani e peso dell'unità di volume

Il peso di volume dei grani è compreso tra 25,5 e 26,2 kN/m³.

Il peso dell'unità di volume misurato sui campioni di qualità Q3 risulta decisamente inferiore a quello atteso per questa litologia (certamente superiore a 20 kN/m²) variando tra 17,8 (S02CR5) e 20,8 (S02CR6) kN/m³.

Contenuto d'acqua naturale

Il contenuto d'acqua naturale misurato in laboratorio risulta compreso fra minimo 13% (S02CR5) e massimo 33% (S02CR3). L'indice dei vuoti risulta compreso tra 0,5 e 0,6.

Limiti di Atterberg

Sulla frazione fine dei campioni sono stati determinati il limite di liquidità (W_L) ed il limite di plasticità (W_P). Il valore dell'indice di plasticità ($IP = W_L - W_P$) varia da 14,3 a 27,2, mentre quelli del limite liquido variano tra 32 e 54. Sulla carta di plasticità (Figura 37), i punti sperimentali ricadono nel campo delle argille organiche di bassa e media plasticità.

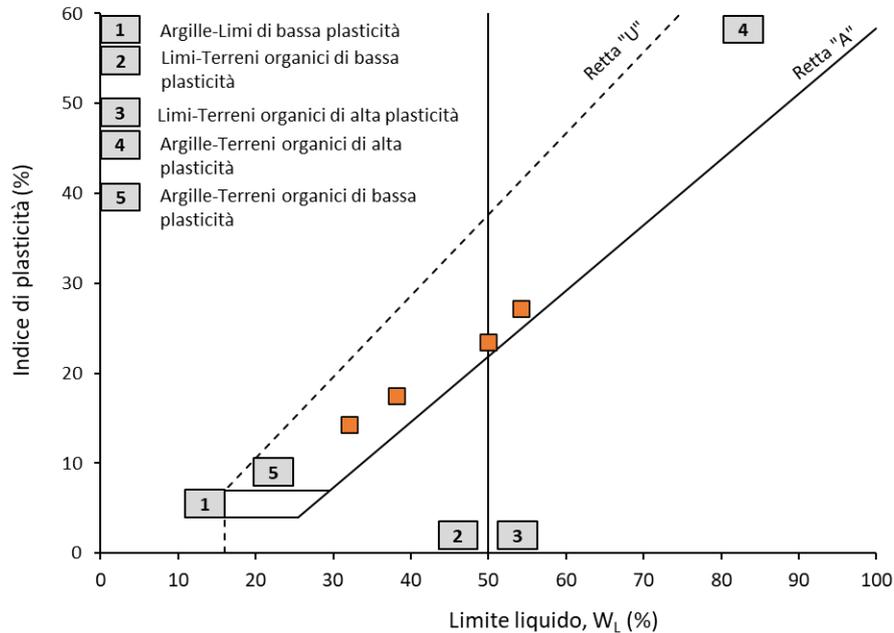


Figura 37 - Unità UG3. Carta di Plasticità di Casagrande

Caratteristiche di resistenza in Tensioni Efficaci

Per le caratteristiche meccaniche dell'unità Ug3 costituita dall'alterazione della formazione Marnoso-Arenacea si fa riferimento a valori di bibliografia tipicamente usati per aree limitrofe a quella di interesse.

Esprimendo i parametri meccanici in termini di angolo di resistenza al taglio ϕ' e coesione c' si ha:

$$\phi' \cong 30^\circ$$

$$c' = 50 \text{ kPa}$$

 CITTÀ METROPOLITANA DI BOLOGNA	LAVORI DI RIPRISTINO DEFINITIVO DELLA SEDE STRADALE E DELLE SCARPATE DI MONTE E DI VALLE DELLA S.P. 610 SELICE O MONTANARA IMOLESE IN COMUNE DI CASTEL DEL RIO E DELLA S.P. 14 IN COMUNE DI IMOLA		
	RELAZIONE GEOTECNICA		Data Maggio 2025
			Rev. 01

11 QUADRO SINOTTICO DEI RISULTATI

Dall'insieme dei risultati ottenuti dalle prove in sito e di laboratorio è possibile dedurre il quadro di sintesi delle caratteristiche geotecniche dei terreni che viene illustrato nella seguente Tabella 1.

		Coltre di copertura	Detrito di versante	Formazione M-A alterata
		Ug1	Ug2	Ug3
Peso di volume	γ [kN/m ³]	19	20	≥ 20
Peso specifico dei grani	γ_s [kN/m ³]	26	26	26
Contenuto d'acqua	w [%]	19.6÷25	14÷20	13÷33
Limite liquido	W_L [%]	32÷35	33÷37	32÷54
Indice di plasticità	I_p [%]	12÷17	13÷18	14÷27
Caratteristiche di resistenza al picco	c_p' / φ_p' [kPa] / [°]	8 / 27	20 / 30	50 / 30
Modulo elastico operativo	E' [MPa]	30	50	85
Velocità onde di taglio	V_s [m/s]	230	400÷500	500÷600

Tabella 1 - Quadro sinottico delle proprietà fisiche, di classificazione e meccaniche riferite delle unità geotecniche