

DOTT. ANDREA TEDOLDI

COMUNE DI SAMOLACO
PROVINCIA DI SONDRIO

PIANO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA
RIQUALIFICAZIONE STRADA DA LOC. PIAZZA
CAPRARA A LOC. SANTA TERESA

PROGETTO
FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA

RELAZIONE GEOTECNICA
(D.M. 14 GENNAIO 2018)

PRATA CAMPORTACCIO, GIUGNO 2026

GEOLOGO

Viale Italia, 21
23020 Prata Camportaccio, SO

DOTT. GEOLOGO
ANDREA TEDOLDI

Tel. 0343 20052
andrea@studiogeologicotedoldi.it

*IL DOCUMENTO È FIRMATO DIGITALMENTE AI SENSI DEL D.LGS. 82/2005 S.M.I. E NORME
COLLEGATE E SOSTITUISCE IL DOCUMENTO CARTACEO E LA FIRMA AUTOGRAFA.*

INDICE

INDICE	2
1 INTRODUZIONE	3
2 PROGETTO	4
3 Modello geotecnico	12
3.1 Introduzione	12
3.2 Unità Geotecnica UG1 – Depositi eluvio-colluviali	13
3.3 Unità Geotecnica UG2 – Substrato roccioso gneissico.....	13
4 VERIFICHE GEOTECNICHE ATTRAVERSAMENTO	14
4.1 Caratteristiche progettuali	14
4.2 5.1 Parametri geotecnici adottati.....	15
4.3 Azioni verticali di progetto	15
4.4 Verifica a capacità portante	16
4.5 Verifica a scorrimento	16
4.6 Verifica a ribaltamento ed eccentricità	17
4.7 Verifica geotecnica degli ancoraggi.....	17
4.8 Cedimenti	18
4.9 Conclusione	19
5 VERIFICHE GEOTECNICHE MURO	19
5.1 Muro/scogliera in tornante o tratto alto	19
5.2 Spinta attiva.....	19
5.3 Verifica al ribaltamento	20
5.4 Scorrimento	21
5.5 Capacità portante su roccia	21
5.6 Conclusioni	21
6 VERIFICHE STABILITÀ GLOBALE.....	22
6.1 Introduzione	22
6.2 Verifica stabilità globale opera-versante.....	22
6.2.1 Condizione assunta.....	22
6.2.2 Parametri ridotti M2.....	22
6.2.3 Verifica ipotesi cautelativa con superficie lungo il contatto roccia-detrito.....	23
6.3 Verifica senza coesione	23
6.4 Conclusione	24
7 CONCLUSIONE	24

1 INTRODUZIONE

La presente relazione geotecnica è stata redatta a supporto del Piano di Fattibilità Tecnico Economica relativo alla riqualificazione della strada agro-silvo-pastorale esistente che collega la località Piazza Caprara alla località Santa Teresa nel Comune di Samolaco.

L'intervento prevede l'adeguamento del tracciato esistente mediante allargamento della sede stradale, realizzazione di muri di sostegno, opere di regimazione idraulica, piazzole di scambio e attraversamento della Valle Bolgadregna mediante ponte a campata unica impostato direttamente sul substrato roccioso affiorante.

La caratterizzazione geotecnica è stata effettuata mediante:

- analisi geomorfologica del sito;
- rilievo geologico degli affioramenti;
- interpretazione geomeccanica degli ammassi rocciosi osservati;
- esame della documentazione progettuale disponibile;
- analisi delle condizioni morfologiche e litologiche presenti lungo il tracciato.

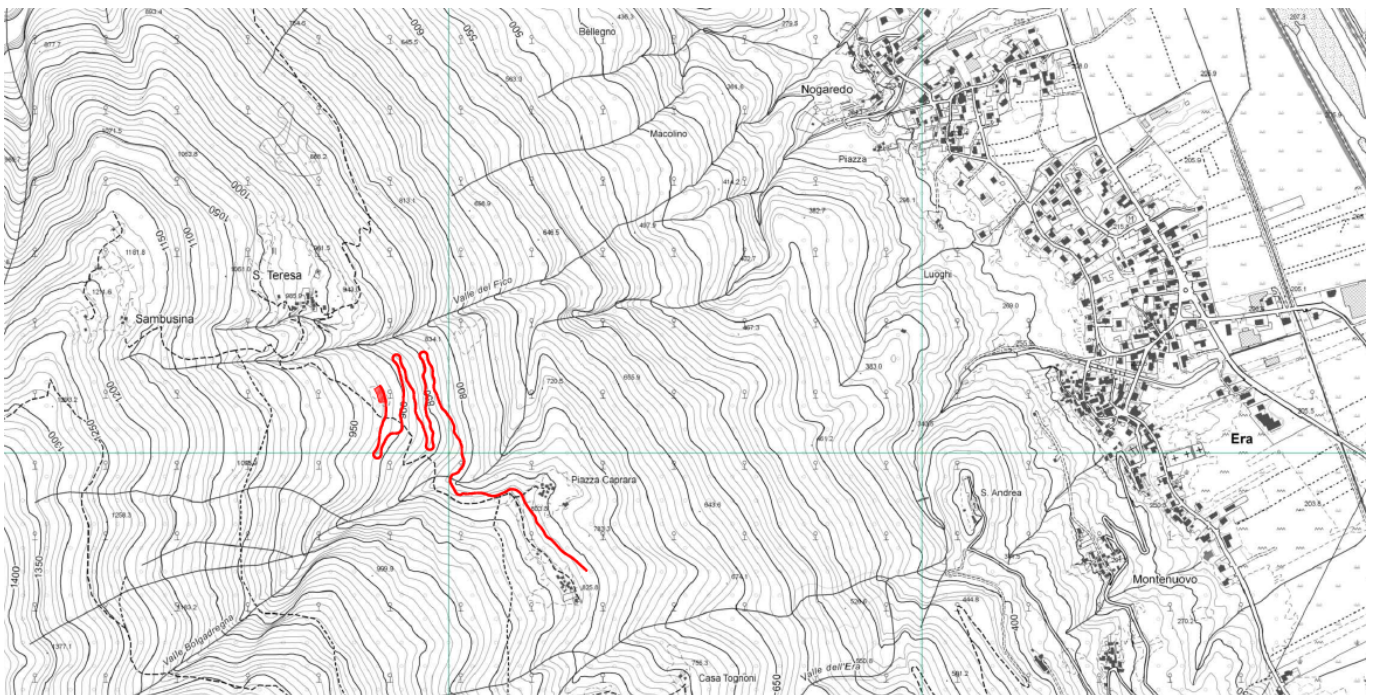


Figura 1: corografia area di intervento

2 PROGETTO

L'intervento in progetto riguarda la realizzazione della strada agro-silvo-pastorale di collegamento tra la località Piazza Caprara e la località Santa Teresa nel Comune di Samolaco, con finalità di miglioramento dell'accessibilità alle aree boscate, supporto alle attività di gestione forestale, prevenzione incendi e agevolazione degli interventi di manutenzione e protezione civile. Il tracciato si sviluppa lungo il versante montano in destra idrografica della Valchiavenna per una lunghezza complessiva di circa 1.600 m, dalla quota iniziale di circa 802 m s.l.m. fino alla quota finale di circa 970 m s.l.m., superando un dislivello complessivo di circa 168 m.

La strada si inserisce in un contesto prevalentemente boscato caratterizzato da morfologia acclive, presenza di coperture detritico-colluviali e frequenti affioramenti rocciosi. Lo sviluppo plano-altimetrico del tracciato è stato adattato all'andamento naturale del versante mediante la realizzazione di quattro tornanti principali che consentono il superamento delle maggiori acclività limitando le pendenze longitudinali della viabilità. Il profilo longitudinale evidenzia una pendenza media dell'ordine del 10-11%, con valori localmente superiori in corrispondenza dei tratti più acclivi e delle curve di inversione.

La piattaforma stradale presenta una larghezza ordinaria compresa tra 3,00 e 3,50 m, con pendenza trasversale del 2% finalizzata all'allontanamento delle acque meteoriche. In corrispondenza dei tornanti e dei punti di possibile incrocio dei veicoli sono previsti allargamenti della carreggiata che svolgono funzione di piazzole di scambio e di manovra per i mezzi forestali. Dal computo metrico risultano quattro allargamenti principali, ciascuno sviluppato per circa 30 m di lunghezza e 2 m di ampliamento laterale, per una superficie complessiva di circa 240 m².

In corrispondenza dell'area terminale presso la località Santa Teresa è prevista la realizzazione di un piazzale destinato alla sosta dei mezzi e alle attività di servizio connesse alla gestione forestale. Dalla documentazione progettuale emerge una superficie pari a circa 612 m², ottenuta mediante uno sviluppo planimetrico di circa 51 m di lunghezza e 12 m di larghezza, idonea ad ospitare sia le manovre dei veicoli sia le operazioni di accatastamento temporaneo del materiale legnoso derivante dagli interventi selvicolturali.

L'opera strutturalmente più significativa è rappresentata dall'attraversamento della Valle Bolgadregna, ubicato in prossimità della passerella pedonale esistente. Il progetto prevede la realizzazione di un manufatto carrabile in cemento armato costituito da una soletta di impalcato avente lunghezza di circa 22,20 m e larghezza di circa 4,00 m, sostenuta da cinque elementi murari portanti in cemento armato fondati direttamente sul substrato roccioso dell'alveo. Le opere di fondazione sono integrate da sistemi di ancoraggio mediante barre tipo Gewi lunghe 4 m, mentre

lateralmente sono previsti parapetti di protezione e cordoli in calcestruzzo armato. La struttura è concepita in modo da garantire la continuità del deflusso idrico sottostante, riducendo al minimo le interferenze con la dinamica torrentizia e consentendo il mantenimento della sezione di deflusso della valle. Durante la fase esecutiva è prevista la realizzazione di opere provvisorie per la deviazione temporanea delle acque e per la protezione del cantiere all'interno dell'alveo.

L'intervento interessa versanti caratterizzati da acclività medio-elevata, con presenza di coperture superficiali di origine colluviale e detritica poggianti su substrato roccioso localmente affiorante. Le sezioni di progetto evidenziano la necessità di realizzare numerosi sbancamenti e opere di sostegno per la formazione della piattaforma stradale. Il computo metrico prevede infatti circa 7.700 m³ di scavi in roccia eseguiti mediante mezzi meccanici con martellone idraulico, oltre a rilevati, scogliere in massi ciclopici e opere di sostegno localizzate nei tratti maggiormente acclivi.

Particolare attenzione è stata dedicata alla regimazione delle acque superficiali, prevedendo lungo il tracciato un sistema di canalette trasversali metalliche, opere di raccolta e dissipazione delle acque meteoriche e sistemazioni delle scarpate di monte e di valle, finalizzate a limitare i fenomeni erosivi e a garantire la stabilità dell'infrastruttura nel tempo.

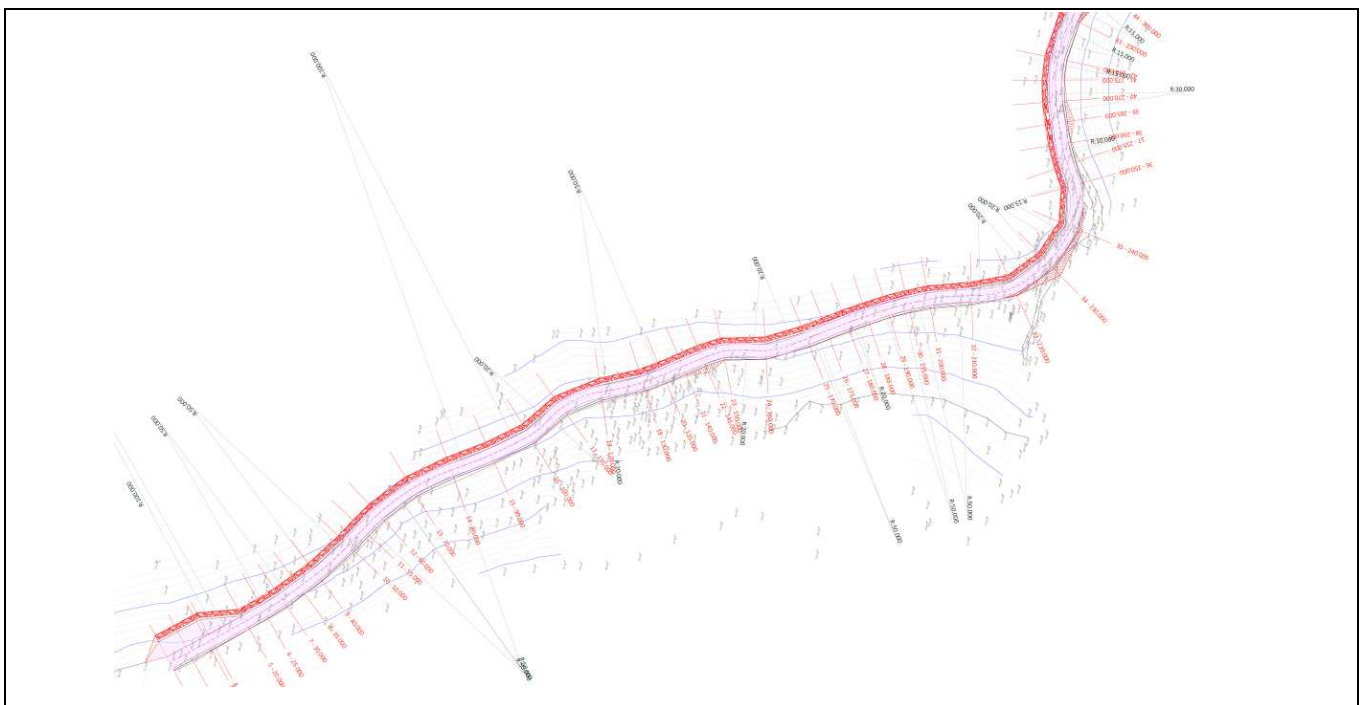


Figura 2: estratto planimetrico tratto iniziale pista in progetto [tavola B3 Studio Maraffio]

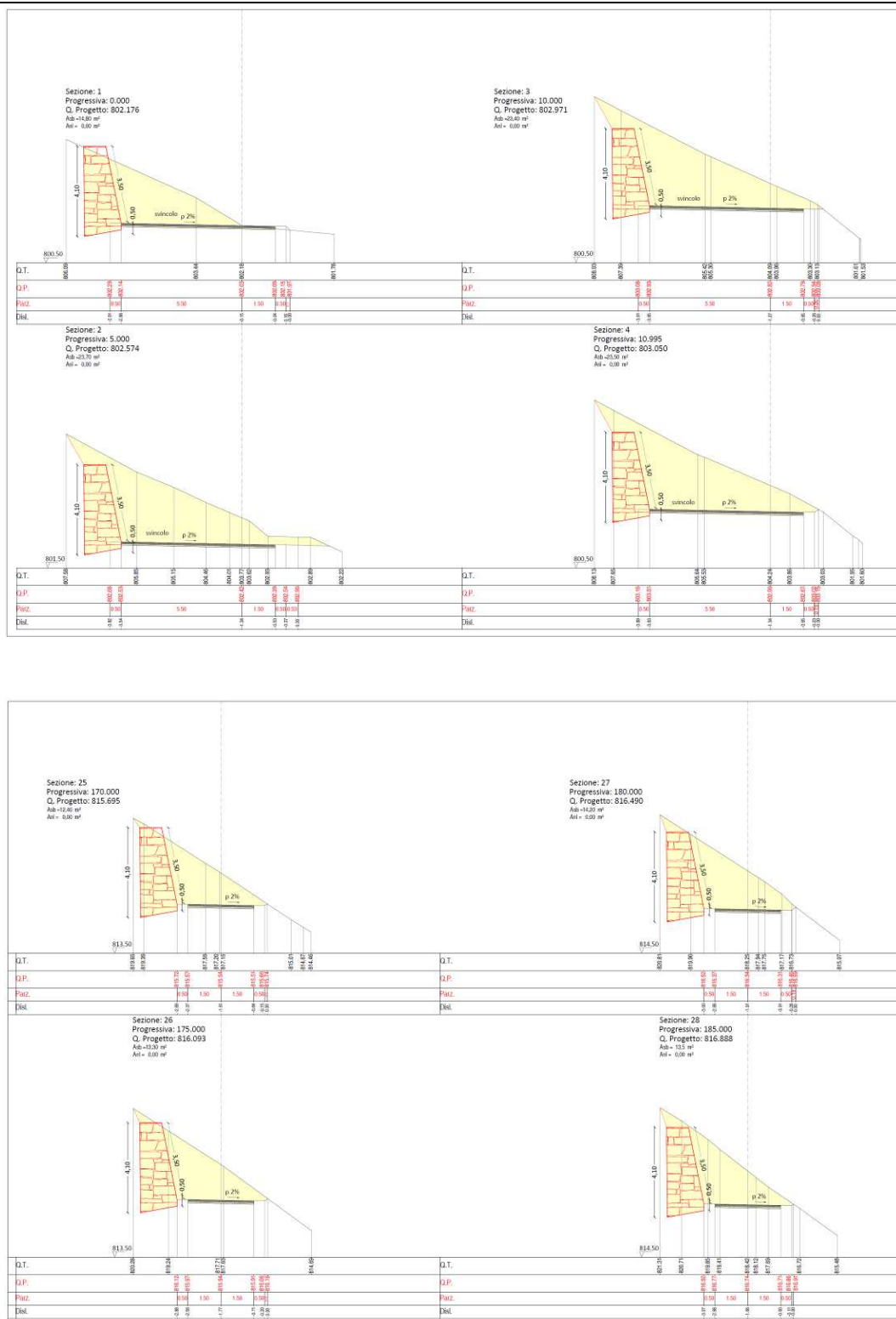


Figura 3: estratto sezioni di progetto più significative tratto iniziale pista in progetto
[tavola B5 Studio Maraffio]

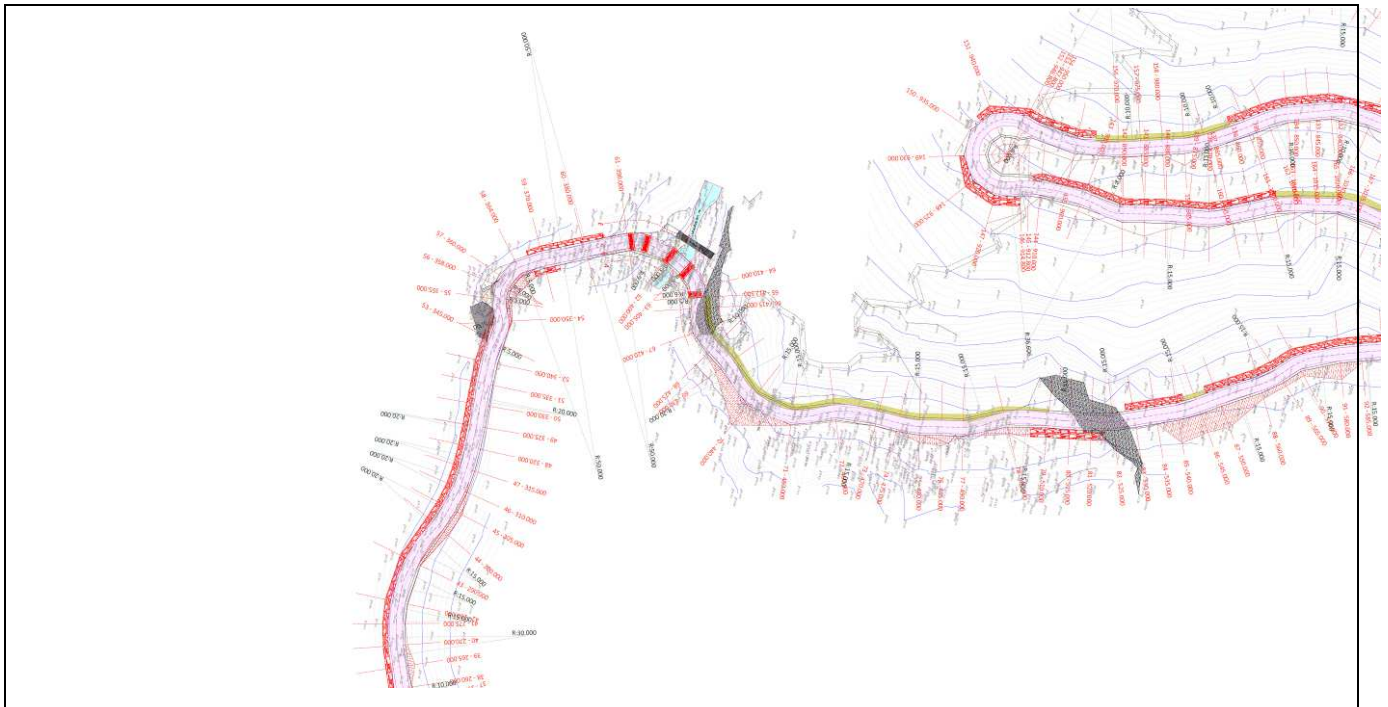


Figura 4: estratto planimetrico tratto attraversamento val Bolgadregna [tavola B3 Studio Maraaffio]

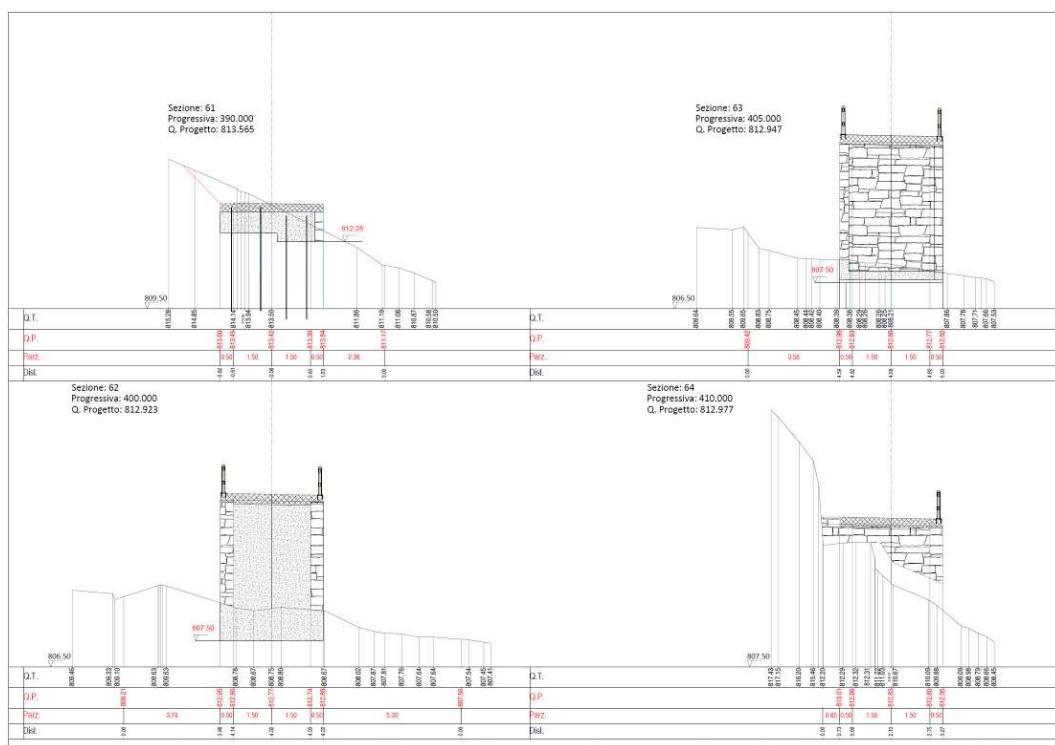


Figura 5a: estratto sezioni di progetto tratto attraversamento val Bolgadregna
[tavola B5 Studio Maraaffio]

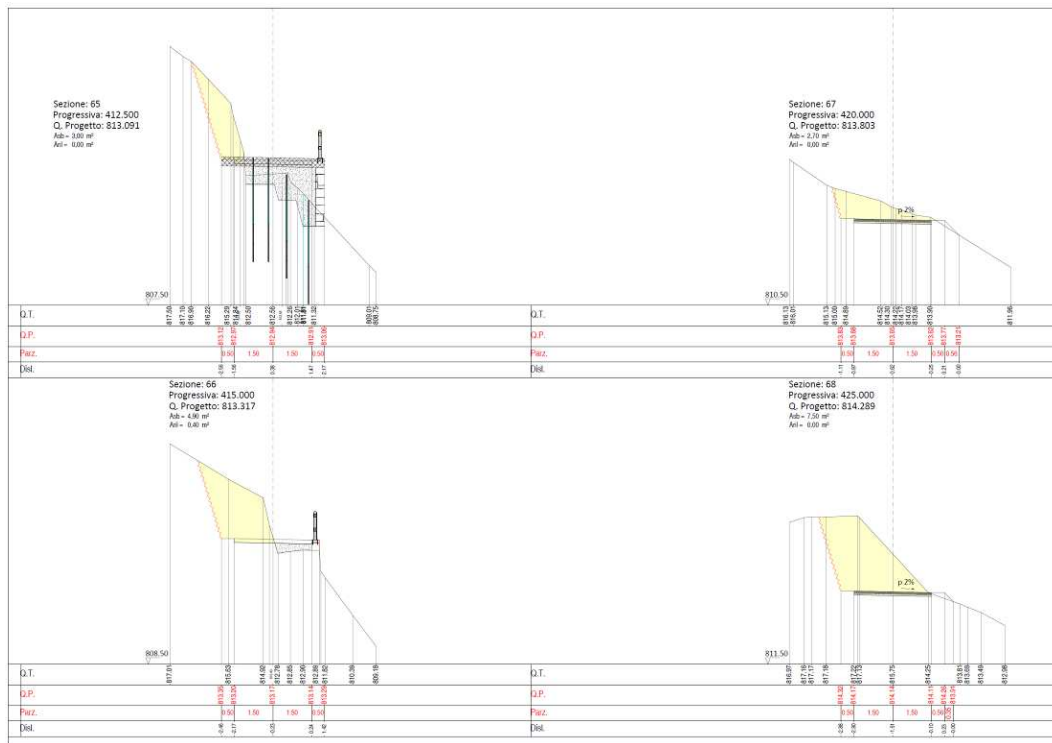


Figura 5b: estratto sezioni di progetto tratto attraversamento val Bolgadregna
[tavola B5 Studio Maraffio]

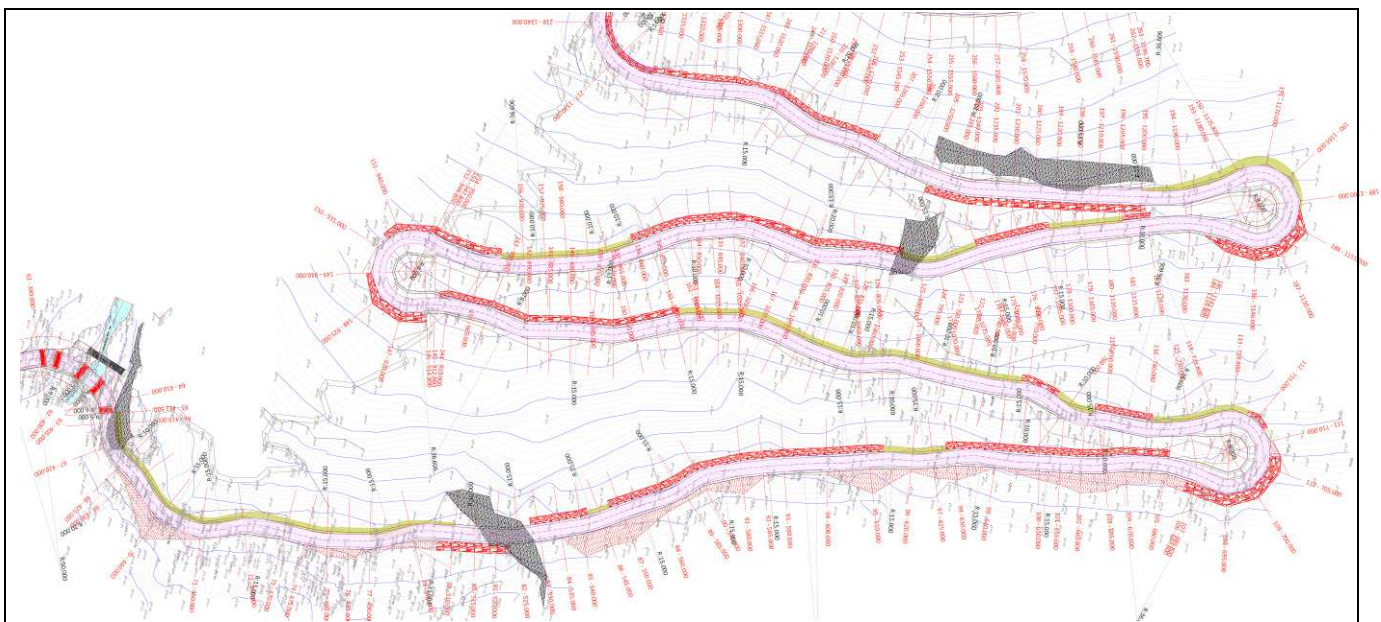


Figura 6: estratto planimetrico tratto a tornanti [tavola B3 Studio Maraffio]

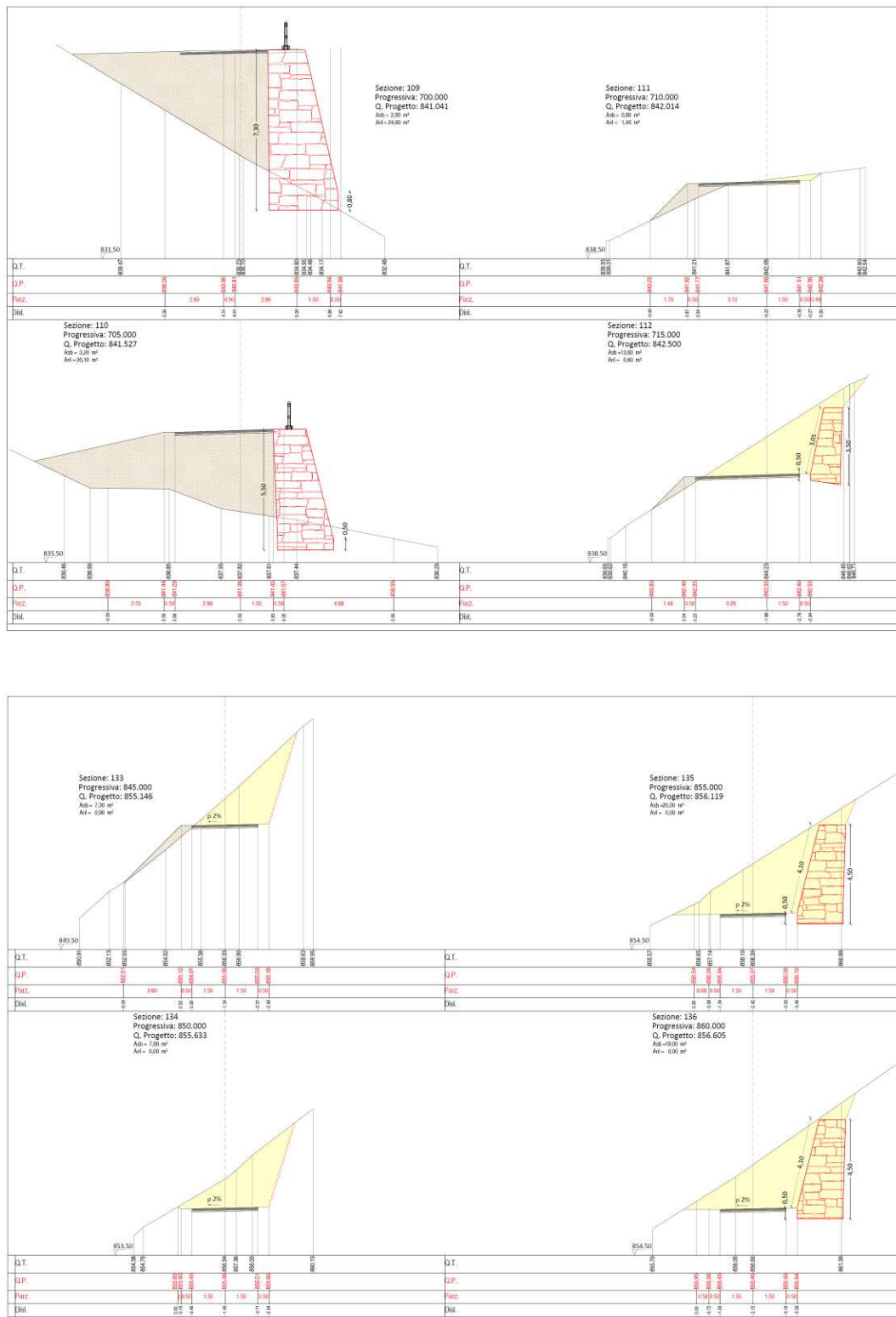


Figura 7a: estratto sezioni di progetto tratto a tornanti [tavola B5 Studio Maraffio]

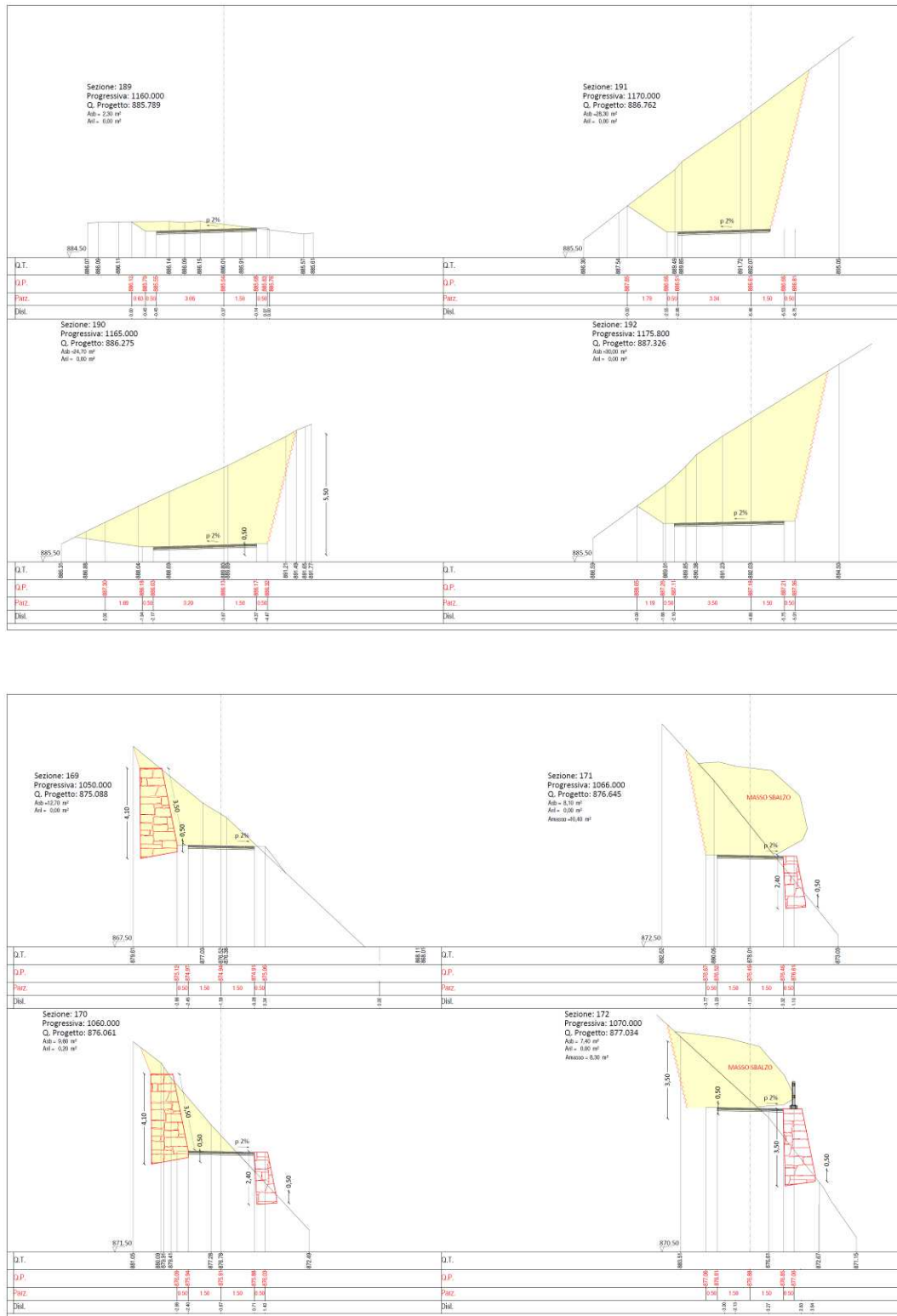


Figura 7b: estratto sezioni di progetto tratto a tornanti [tavola B5 Studio Maraffio]

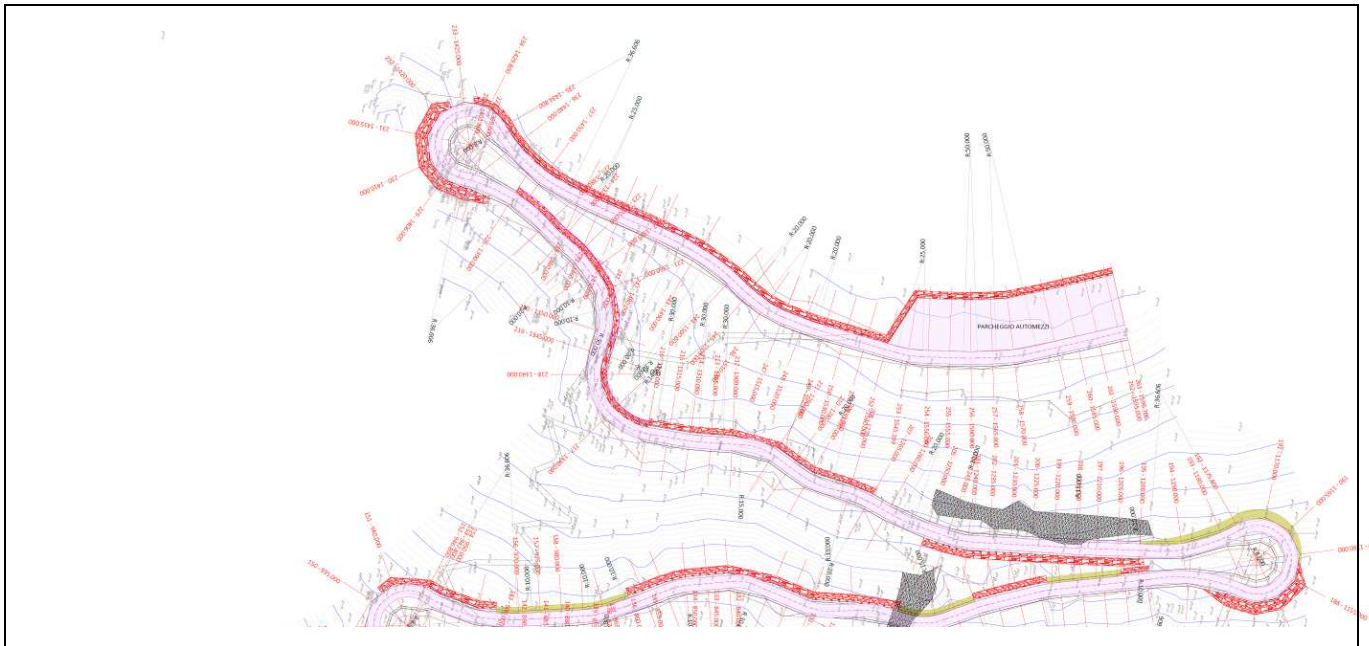


Figura 8: estratto planimetrico tratto finale [tavola B3 Studio Maraaffio]

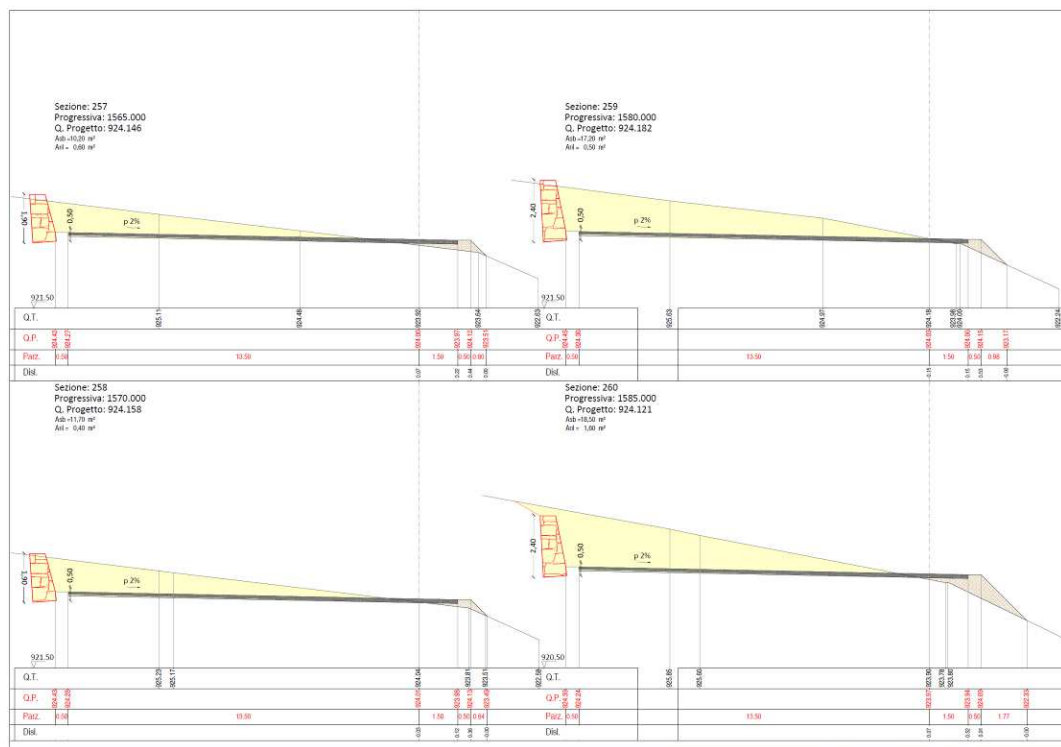


Figura 9: estratto sezioni di progetto tratto finale [tavola B5 Studio Maraaffio]

3 MODELLO GEOTECNICO

3.1 Introduzione

Il modello geotecnico di riferimento è stato definito sulla base dell'analisi geomorfologica del versante, dell'esame degli affioramenti rocciosi osservati lungo il tracciato e in corrispondenza dell'attraversamento della Valle Bolgadregna, nonché dell'interpretazione geomeccanica delle fotografie di dettaglio acquisite durante i sopralluoghi.

L'area di intervento è caratterizzata dalla presenza di un substrato roccioso appartenente al basamento cristallino alpino, costituito da gneiss e rocce metamorfiche quarzofeldspatiche mediamente fratturate, localmente affioranti o subaffioranti lungo gran parte del tracciato. La roccia si presenta generalmente compatta, con grado di alterazione superficiale limitato, discontinuità mediamente spaziate e assenza di significative zone cataclastiche o fortemente degradate. In corrispondenza dell'attraversamento della Valle Bolgadregna il substrato risulta completamente affiorante e direttamente inciso dall'alveo torrentizio, costituendo il naturale piano di fondazione delle opere previste.

Al di sopra del substrato roccioso è presente una coltre eluvio-colluviale di limitato spessore, generalmente compreso tra alcuni decimetri e circa 1.0÷1.5 m valore cautelativo assunto nelle verifiche 3 m, costituita da detrito grossolano derivante dall'alterazione della roccia in posto, formato da ghiaie, blocchi e scaglie lapidee immerse in una modesta matrice sabbioso-limosa. Tale materiale presenta caratteristiche di addensamento medio-elevato e comportamento prevalentemente granulare.

Per la definizione delle resistenze di progetto nelle verifiche agli Stati Limite Ultimi sono stati applicati i coefficienti parziali previsti dal D.M. 17/01/2018 secondo le combinazioni di verifica adottate. In particolare, per le verifiche di stabilità globale è stata utilizzata la combinazione **A2+M2+R2**, mentre per le verifiche di capacità portante, scorrimento, ribaltamento ed eccentricità delle fondazioni e delle opere di sostegno è stata adottata la combinazione **A1+M1+R3**.

Il modello geotecnico così definito è stato assunto come riferimento per tutte le verifiche di capacità portante delle fondazioni, per la valutazione della stabilità delle murature di sostegno, per la verifica degli ancoraggi in roccia e per la verifica di stabilità globale del complesso opera-versante previste dal presente progetto

Ai fini delle verifiche geotecniche sono state pertanto individuate due distinte unità geotecniche di riferimento di seguito descritte.

3.2 Unità Geotecnica UG1 – Depositi eluvio-colluviali

Costituita da terreno detritico grossolano derivante dall'alterazione del substrato roccioso, con comportamento drenato e caratteristiche meccaniche assimilabili a ghiaie e detriti addensati con scarsa matrice fine.



Foto 1 e 2: scapata naturale terreno interessato da intervento

Parametri geotecnici caratteristici adottati:

Parametro	Valore
Peso di volume naturale γ	20 kN/m ³
Angolo di attrito efficace ϕ^k	38°
Coesione efficace c^k	5 kPa
Modulo deformativo E	50 MPa
Coefficiente di Poisson ν	0,30

3.3 Unità Geotecnica UG2 – Substrato roccioso gneissico

Costituita da ammasso roccioso moderatamente fratturato, con caratteristiche geomeccaniche riconducibili ad una roccia di buona qualità. Dall'analisi delle discontinuità osservabili negli affioramenti sono stati stimati valori di RQD dell'ordine dell'85%.



Foto 3 e 4: affioramenti ammasso roccioso interessato da intervento

Parametri geomeccanici adottati:

Parametro	Valore
Peso di volume γ	26,5 kN/m ³
Resistenza a compressione σ_{ci}	100 MPa
RQD	85 %
GSI	65
RMR	70
Modulo deformativo ammasso E	10 GPa
Coefficiente di Poisson ν	0,22
Angolo di attrito efficace ϕ^k	48°
Coesione equivalente c^k	400 kPa

4 VERIFICHE GEOTECNICHE ATTRAVERSAMENTO

4.1 Caratteristiche progettuali

Le verifiche geotecniche sono state condotte ai sensi del D.M. 17/01/2018, assumendo lo schema di verifica agli Stati Limite Ultimi con Approccio 2: A1 + M1 + R3, considerando il substrato roccioso affiorante come terreno di fondazione dell'opera. L'attraversamento della Valle Bolgadregna interessa le sezioni 61–65, tra progressiva 390.00 m e 412.50 m; dalla sezione C-C' si ricavano

sviluppo longitudinale 22.20 m, larghezza 5.00 m e spessore impalcato indicato 0.35 m. Nei prospetti l'opera risulta impostata su più sostegni in corrispondenza dell'alveo roccioso inciso. L'elenco prezzi prevede inoltre ancoraggi in barre d'acciaio Gewi Ø28 mm L=4 m e barre Ø32 mm L=4 m.

4.2 5.1 Parametri geotecnici adottati

Per il substrato roccioso gneissico affiorante, sulla base delle fotografie e del rilievo geomeccanico speditivo, si assumono:

$$\gamma = 26.5 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_{ci} = 100 \text{ MPa}$$

$$RQD = 85\%$$

$$GSI = 65$$

$$RMR = 70$$

$$\varphi'_k = 48^\circ$$

$$c'_k = 400 \text{ kPa}$$

$$E_{amm} = 10 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0.22$$

Ai fini della capacità portante su roccia si assume cautelativamente:

$$q_k = 3.0 \text{ MPa} = 3000 \text{ kPa}$$

Con coefficiente parziale **R3 = 2.3**:

$$q_{Rd} = q_k / \gamma_R = 3000 / 2.3 = \mathbf{1304 \text{ kPa}}$$

4.3 Azioni verticali di progetto

Dati geometrici dell'impalcato:

$$L = 22.20 \text{ m}$$

$$B = 5.00 \text{ m}$$

$$s = 0.35 \text{ m}$$

Volume soletta:

$$V = 22.20 \times 5.00 \times 0.35 = 38.85 \text{ m}^3$$

Peso proprio soletta in c.a.:

$$G1_k = 38.85 \times 25 = 971 \text{ kN}$$

Sovraccarichi permanenti non strutturali, parapetti, finiture e complementi, assunti cautelativamente:

$$G2_k = 2.0 \text{ kN/m}^2 \times 22.20 \times 5.00 = 222 \text{ kN}$$

Carico variabile di esercizio assunto cautelativamente per pista agro-silvo-pastorale:

$$Q_k = 10.0 \text{ kN/m}^2 \times 22.20 \times 5.00 = 1110 \text{ kN}$$

Combinazione SLU:

$$V_{Ed} = 1.3 \times (G1k + G2k) + 1.5 \times Qk$$

$$V_{Ed} = 1.3 \times (971 + 222) + 1.5 \times 1110$$

$$V_{Ed} = 3216 \text{ kN}$$

Carico distribuito equivalente lungo l'asse:

$$q_{Ed} = 3216 / 22.20 = 145 \text{ kN/m}$$

Lo schema della sezione C-C' individua cinque sostegni con luci parziali pari a circa 4.70 m, 3.60 m, 4.70 m e 2.00 m, e larghezze dei sostegni comprese tra circa 1.15 m e 1.55 m. Il massimo carico verticale di progetto per sostegno interno viene assunto pari a:

$$N_{Ed,max} = 900 \text{ kN}$$

4.4 Verifica a capacità portante

Per un sostegno tipo:

$$B_f = 1.50 \text{ m}$$

$$L_f = 5.00 \text{ m}$$

$$A = 7.50 \text{ m}^2$$

Pressione media agente:

$$\sigma_{Ed} = N_{Ed} / A = 900 / 7.50 = \mathbf{120 \text{ kPa}}$$

Resistenza di progetto:

$$q_{Rd} = \mathbf{1304 \text{ kPa}}$$

Verifica:

$$\sigma_{Ed} \leq q_{Rd}$$

$$120 \text{ kPa} \leq 1304 \text{ kPa}$$

Verifica soddisfatta.

4.5 Verifica a scorrimento

Si considera la resistenza per attrito alla base, trascurando cautelativamente il contributo coesivo pieno della roccia.

Angolo di attrito all'interfaccia calcestruzzo-roccia:

$$\delta_k = 2/3 \varphi'_k = 2/3 \times 48^\circ = \mathbf{32^\circ}$$

$$\tan \delta = 0.625$$

Resistenza caratteristica:

$$R_k = N_{Ed} \times \tan \delta$$

$$R = 900 \times 0.625 = \mathbf{563 \text{ kN}}$$

Con coefficiente parziale per scorrimento:

$$\gamma_R = 1.1$$

$$R_d = 563 / 1.1 = \mathbf{512 \text{ kN}}$$

Assumendo azione orizzontale di progetto cautelativa per sostegno:

$$H_{Ed} = \mathbf{150 \text{ kN}}$$

Verifica:

$$H_{Ed} \leq R_d$$

$$150 \text{ kN} \leq 512 \text{ kN}$$

Verifica soddisfatta.

4.6 Verifica a ribaltamento ed eccentricità

Assumendo l'azione orizzontale applicata con braccio cautelativo:

$$h = 2.00 \text{ m}$$

Momento ribaltante:

$$M_{Ed} = H_{Ed} \times h$$

$$M_{Ed} = 150 \times 2.00 = 300 \text{ kNm}$$

Eccentricità della risultante:

$$e = M_{Ed} / N_{Ed}$$

$$e = 300 / 900 = 0.33 \text{ m}$$

Limite del terzo medio:

$$B_f / 6 = 1.50 / 6 = 0.25 \text{ m}$$

La risultante esce dal terzo medio, quindi la base viene verificata con area efficace ridotta:

$$B' = B_f - 2e$$

$$B' = 1.50 - 2 \times 0.33 = 0.84 \text{ m}$$

$$A' = B' \times L_f$$

$$A' = 0.84 \times 5.00 = 4.20 \text{ m}^2$$

Pressione efficace:

$$\sigma_{Ed,max} = N_{Ed} / A'$$

$$\sigma_{Ed,max} = 900 / 4.20 = 214 \text{ kPa}$$

Confronto:

$$214 \text{ kPa} \leq 1304 \text{ kPa}$$

Verifica soddisfatta

4.7 Verifica geotecnica degli ancoraggi

Si considerano barre $\varnothing 32 \text{ mm}$ $L = 4.00 \text{ m}$, cementate con boiacca in foro $\varnothing 50\text{--}60 \text{ mm}$.

Diametro foro assunto:

$$D_f = 50 \text{ mm}$$

Lunghezza efficace in roccia:

$$L = 4.00 \text{ m}$$

Tensione di aderenza caratteristica roccia-boiacca:

$$\tau_k = 0.50 \text{ MPa} = 500 \text{ kPa}$$

Resistenza caratteristica a sfilamento:

$$R_k = \pi \times D_f \times L \times \tau_k$$

$$R_k = 3.14 \times 0.05 \times 4.00 \times 500$$

$$R_k = 314 \text{ kN/barra}$$

Con coefficiente parziale:

$$\gamma_R = 1.5$$

$$R_d = 314 / 1.5 = 209 \text{ kN/barra}$$

Si adottano almeno 4 barre $\varnothing_{32}$ mm per sostegno:

$$R_{d\text{tot}} = 4 \times 209 = 836 \text{ kN}$$

Momento eccedente rispetto al terzo medio:

$$\Delta M = M_{Ed} - N_{Ed} \times B_f/6$$

$$\Delta M = 300 - 900 \times 0.25$$

$$\Delta M = 75 \text{ kNm}$$

Braccio resistente degli ancoraggi:

$$z = 1.20 \text{ m}$$

Trazione totale richiesta:

$$T_{Ed} = \Delta M / z$$

$$T_{Ed} = 75 / 1.20 = \mathbf{62.5 \text{ kN}}$$

Trazione per barra:

$$T_{Ed,barra} = 62.5 / 4 = \mathbf{15.6 \text{ kN/barra}}$$

Verifica:

$$T_{Ed,barra} \leq R_d$$

$$15.6 \text{ kN} \leq 209 \text{ kN}$$

Verifica a sfilamento soddisfatta.

4.8 Cedimenti

Il substrato di fondazione è costituito da ammasso roccioso gneissico affiorante con modulo deformativo dell'ordine di:

$$E_{amm} = 10 \text{ GPa}$$

Le pressioni massime trasmesse risultano comprese tra 120 e 214 kPa che risultano essere valori molto inferiori alla capacità portante di progetto dell'ammasso roccioso. I cedimenti assoluti e differenziali attesi sono pertanto trascurabili ai fini dell'opera.

4.9 Conclusione

Le verifiche geotecniche condotte secondo NTC 2018, Approccio 2 A1+M1+R3, forniscono esito positivo per:

- capacità portante del substrato roccioso;
- scorrimento alla base;
- ribaltamento ed eccentricità della risultante;
- sfilamento geotecnico degli ancoraggi;
- cedimenti.

Le verifiche sono state effettuate considerando la posa in roccia di 4 barre Ø32 mm L=4.00 m per ciascun sostegno principale, cementate con boiacca antiritiro in fori Ø50–60 mm, previa completa pulizia della superficie rocciosa, rimozione della porzione di ammasso roccioso alterata.

5 VERIFICHE GEOTECNICHE MURO

5.1 Muro/scogliera in tornante o tratto alto

H = 5,00 m

Fondazione su roccia

Spinta terreno retrostante limitata a 3,00 m

Sovraccarico stradale q = 20 kPa

Terreno: $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, $\varphi' = 38^\circ$, $c' = 0$

$K_a = 0,238$

Muro in massi ciclopici/scogliera a secco, con scarpa interna 30%.

5.2 Spinta attiva

Si considera lo spessore di terreno spingente a tergo massimo di 3 m, non considero spinta triangolare su 5 m pieni come muro interrato classico, ma considero:

Spinta da terreno su altezza equivalente 3 m:

$$P_a = 0,5 \times K_a \times \gamma \times 3^2$$

$$P_a = 0,5 \times 0,238 \times 20 \times 9 = 21,4 \text{ kN/m}$$

Spinta da sovraccarico su 3 m:

$$P_q = K_a \times q \times 3$$

$$P_q = 0,238 \times 20 \times 3 = 14,3 \text{ kN/m}$$

Spinta totale caratteristica:

$$P_k = 35,7 \text{ kN/m}$$

Con coefficienti SLU:

$$P_{ad} = 1,3 \times 21,4 = 27,8 \text{ kN/m}$$

$$P_{qd} = 1,5 \times 14,3 = 21,5 \text{ kN/m}$$

Spinta totale di progetto:

$$E_d = 49,3 \text{ kN/m}$$

5.3 Verifica al ribaltamento

Momento ribaltante

Per muro alto 5 m con spinta applicata nella parte alta retrostante la strada, assumo cautelativamente un braccio pari a $z = 3,50 \text{ m}$.

$$M_{Ed} = 49,3 \times 3,50 = 172,6 \text{ kNm/m}$$

Peso stabilizzante muro alto 5 m

Con sommità 0,80 m e scarpa interna 30%:

$$B_{base} = 0,80 + 0,30 \times 5,00 = 2,30 \text{ m}$$

Area sezione:

$$A = (0,80 + 2,30)/2 \times 5,00 = 7,75 \text{ m}^2/\text{m}$$

Peso muro:

$$W = 7,75 \times 26,5 = 205 \text{ kN/m}$$

Momento stabilizzante:

$$M_{Rd} = W \times B/2$$

$$M_{Rd} = 205 \times 1,15 = 236 \text{ kNm/m}$$

Verifica:

$$172,6 < 236 \text{ kNm/m}$$

Ribaltamento verificato

5.4 Scorrimento

$$\delta = 35^\circ$$

$$\tan \delta = 0,70$$

$$R_k = W \times \tan \delta = 205 \times 0,70 = 144 \text{ kN/m}$$

$$R_d = 144 / 1,1 = 131 \text{ kN/m}$$

Verifica:

$$49,3 < 131 \text{ kN/m}$$

Scorrimento verificato.

5.5 Capacità portante su roccia

Eccentricità:

$$e = M_{Ed} / W = 172,6 / 205 = \mathbf{0,84 \text{ m}}$$

$$B/6 = 2,30/6 = \mathbf{0,38 \text{ m}}$$

La risultante esce dal terzo medio, quindi si usa base efficace:

$$B' = B - 2e = 2,30 - 1,68 = \mathbf{0,62 \text{ m}}$$

Pressione efficace:

$$\sigma_{Ed} = W / B' = 205 / 0,62 = \mathbf{331 \text{ kPa}}$$

Capacità portante di progetto roccia:

$$q_{Rd} = 3000 / 2,3 = \mathbf{1304 \text{ kPa}}$$

Verifica:

$$331 < 1304 \text{ kPa}$$

Capacità portante verificata.

5.6 Conclusioni

Le verifiche geotecniche sono state condotte ai sensi del D.M. 17/01/2018 e della Circolare C.S.LL.PP. n. 7/2019, con riferimento agli SLU di tipo GEO e STR. Per le verifiche locali di capacità portante, scorrimento ed eccentricità delle fondazioni è stato adottato l'Approccio 2, combinazione A1+M1+R3. Le azioni stabilizzanti sono state considerate con il coefficiente previsto per azioni favorevoli, mentre le azioni destabilizzanti sono state amplificate secondo A1.

6 VERIFICHE STABILITÀ GLOBALE

6.1 Introduzione

Per la verifica alla stabilità globale ho considerato una superficie di scivolamento parzialmente nel detrito, perché dagli elaborati di progetto e dalle verifiche svolte dallo scrivente il tracciato è impostato prevalentemente su substrato roccioso e le murature sono previste con fondazione su roccia.

La relazione PFTE indica un versante con una pendenza media di circa 39°, sede stradale prevalentemente in sbancamento, muri di altezza media compresa tra 2,50 e 3,00 m escludendo i tornanti. Le scarpate presentano un'inclinazione 1/1 a monte e 2/3 a valle. Il progetto prevede di realizzare le opere di contenimento in massi ciclopici e ancoraggi Ø32 con perforazione >50 mm e calcestruzzo.

6.2 Verifica stabilità globale opera-versante

Per la stabilità globale è stata adottato l' **Approccio 1 – Combinazione 2: A2 + M2 + R2** con verifica:

$$Ed \leq Rd$$

oppure, in forma equivalente:

$$FSd \geq 1.00$$

6.2.1 Condizione assunta

Versante: $\beta = 39^\circ$

Altezza muro in tornante: $H = 5.00$ m

Spessore massimo terreno retrostante spingente: $z = 3.00$ m

Fondazione: roccia affiorante

Sovraccarico stradale: $q_k = 20$ kPa

$q_{Ed} = 1.30 \times 20 = 26$ kPa

6.2.2 Parametri ridotti M2

Per il terreno detritico:

$\varphi'_k = 38^\circ$

$\tan \varphi'_d = \tan 38^\circ / 1.25$

$\varphi'_d = 32^\circ$

$c'_k = 5$ kPa

$c'_d = 5 / 1.25 = 4$ kPa

Per la roccia gneissica:

$$\varphi'_k = 48^\circ$$

$$\tan\varphi'_d = \tan 48^\circ / 1.25$$

$$\varphi'_d = 41.6^\circ$$

$$c'_k = 400 \text{ kPa}$$

$$c'_d = 400 / 1.25 = 320 \text{ kPa}$$

Nella verifica globale su contatto roccia-detrito non si è considerata cautelativamente tutta la coesione dell'ammasso roccioso ma assunta una coesione ridotta:

$$c'_{d,mob} = 20 \text{ kPa}$$

6.2.3 Verifica ipotesi cautelativa con superficie lungo il contatto roccia-detrito

Si assume una superficie di scivolamento parallela al versante, impostata lungo il contatto tra coltre detritica e substrato roccioso.

Formula:

$$FS = [c'_d + (\gamma z \cos^2\beta + q_{Ed} \cos^2\beta) \tan\varphi'_d] / [(\gamma z \sin\beta \cos\beta + q_{Ed} \sin\beta \cos\beta)]$$

Dati:

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$z = 3.00 \text{ m}$$

$$\beta = 39^\circ$$

$$q_{Ed} = 26 \text{ kPa}$$

$$\varphi'_d = 41.6^\circ$$

$$c'_{d,mob} = 20 \text{ kPa}$$

Risultato:

$$FS_d = 1.57$$

Verifica:

$$FS_d = 1.57 > 1.00$$

Stabilità globale verificata.

6.3 Verifica senza coesione

Assumendo cautelativamente:

$$c'_d = 0 \text{ kPa}$$

si ottiene:

$$FS_d = 1.10$$

Applicando il coefficiente R2 sulla resistenza globale:

$$FSd,R2 = 1.10 / 1.10 = 1.00$$

La verifica risulta all'equilibrio annullando completamente il contributo coesivo lungo il contatto roccioso e senza tenere conto dell'ingranamento dei grani e dell'eterogeneità del terreno che aumenterebbero la stabilità del materiale.

6.4 Conclusione

La verifica di stabilità globale del complesso opera-versante è stata condotta secondo NTC 2018 mediante Approccio 1, Combinazione 2, A2+M2+R2.

È stata assunta la condizione più gravosa rappresentata dai tratti in tornante, con muro/scogliera di altezza pari a 5,00 m, fondazione impostata su roccia e spessore massimo di terreno retrostante pari a 3,00 m. La superficie di potenziale scivolamento è stata considerata lungo il contatto tra coltre detritica e substrato roccioso. Con i parametri geotecnici ridotti secondo M2 e considerando una coesione mobilitabile ridotta lungo il contatto roccioso pari a 20 kPa, il coefficiente di sicurezza di progetto risulta $FSd = 1,57$, superiore al valore limite unitario. Anche trascurando completamente il contributo coesivo, la verifica risulta al limite ma compatibile, con $FSd \approx 1,00$ dopo applicazione del coefficiente R2. Pertanto la stabilità globale dell'opera risulta verificata, subordinatamente alla prescrizione di fondare le murature esclusivamente su roccia sana, rimuovendo integralmente coltri alterate, detrito sciolto e materiale vegetale, e prevedendo per i tratti più alti l'impiego di barre $\varnothing_{32}$ mm di lunghezza $L = 4,00$ m cementate in roccia con spaziatura in genere non superiore a 1,50 m.

7 CONCLUSIONE

Le verifiche geotecniche sviluppate nell'ambito del presente Piano di Fattibilità Tecnico Economica sono state condotte sulla base del modello geotecnico definito mediante l'analisi geomorfologica del sito, l'interpretazione geologica degli affioramenti presenti lungo il tracciato e la caratterizzazione geomeccanica del substrato roccioso osservato in corrispondenza delle opere in progetto.

Le verifiche sono state eseguite in conformità al D.M. 17 gennaio 2018 (NTC 2018) e alla relativa Circolare Applicativa n. 7 del 21 gennaio 2019, adottando le combinazioni di verifica previste per le opere geotecniche. In particolare, le verifiche locali di capacità portante, scorrimento, ribaltamento ed eccentricità sono state sviluppate mediante Approccio 2 (A1+M1+R3), mentre la

verifica di stabilità globale del complesso opera-versante è stata condotta mediante Approccio 1 – Combinazione 2 (A2+M2+R2).

Le analisi effettuate hanno evidenziato che il tracciato stradale risulta impostato prevalentemente su substrato roccioso affiorante o sub affiorante costituito da gneiss moderatamente fratturato e caratterizzato da buone proprietà geomeccaniche. Le coperture detritiche presenti lungo il versante risultano generalmente di spessore limitato e non determinano condizioni di criticità nei confronti della stabilità delle opere previste.

Le verifiche di capacità portante eseguite per le fondazioni delle opere di attraversamento della Valle Bolgadregna hanno evidenziato tensioni trasmesse al terreno di fondazione compatibili con la resistenza di progetto dell'ammasso roccioso applicando i coefficienti di sicurezza di norma e cedimenti attesi trascurabili.

Le verifiche a scorrimento e ribaltamento delle strutture di fondazione e dei sostegni dell'attraversamento hanno fornito esito positivo, risultando verificate anche nelle condizioni più gravose considerate. Analogamente, le verifiche degli ancoraggi in barre d'acciaio cementate nel substrato roccioso sono risultate verificate nei confronti dello sfilamento geotecnico.

Per quanto riguarda le opere di sostegno previste lungo il tracciato, le verifiche sono state sviluppate considerando la configurazione più sfavorevole individuabile nel progetto, rappresentata da murature e scogliere di altezza fino a circa 5.00 m, fondate direttamente su roccia e soggette ad una spinta attiva corrispondente ad uno spessore massimo di terreno retrostante pari a circa 3.00 m. Anche in tali condizioni le verifiche di scorrimento, ribaltamento, eccentricità e capacità portante hanno fornito esito positivo, evidenziando la piena compatibilità delle opere con le caratteristiche geotecniche del sito.

La verifica di stabilità globale del sistema opera-versante, eseguita nella configurazione più gravosa e con parametri ridotti secondo il gruppo M2 previsto dalle NTC 2018, ha restituito coefficienti di sicurezza compatibili con i requisiti normativi, confermando la sostanziale stabilità dell'insieme costituito dalle opere di sostegno, dal versante e dal substrato roccioso di fondazione.

Alla luce delle verifiche eseguite si può pertanto concludere che le opere previste dal progetto risultano geotecnicamente compatibili con le caratteristiche del sito, non emergendo elementi tali da pregiudicarne la realizzazione sotto il profilo della capacità portante, della stabilità locale delle opere o della stabilità globale del versante.

La realizzazione degli interventi dovrà essere accompagnata dalla preventiva rimozione delle coperture alterate e del terreno vegetale in corrispondenza delle fondazioni, dalla posa delle opere direttamente su substrato roccioso competente non alterato intensamente fratturato, dalla corretta regimazione delle acque superficiali e dall'esecuzione degli ancoraggi previsti nei tratti caratterizzati

dalle maggiori altezze di sostegno, al fine di mantenere nel tempo le condizioni di stabilità considerate nelle presenti verifiche.

Sulla base degli elementi disponibili e del livello di approfondimento progettuale le verifiche eseguite hanno dato esito favorevole nei confronti degli stati limite considerati.