

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA

U.O.: OPERE GEOTECNICHE

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA

**LINEA COSENZA – PAOLA / S. LUCIDO
NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA
RADDOPPIO COSENZA – PAOLA / S. LUCIDO**

Relazione di calcolo rilevati

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA Progr. REV.

RC1C 03 R 11 RH GE0006 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	L. Sbrenna	Novembre 2021	G. Scasserra / L. Giannini	Novembre 2021	I. D'Amore	Novembre 2021	L. Berardi Novembre 2021



File: RC1C03R11RHGE0001001A.docx

n. Elab.:

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	4
2	NORMATIVA, BIBLIOGRAFIA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	5
2.1	NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO	5
2.2	DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO.....	5
2.3	SOFTWARE	5
3	CARATTERISTICHE DELLE SEZIONI IN RILEVATO.....	6
3.1	RILEVATI FERROVIARI	6
3.1.1	<i>Rilevati ferroviari lato Cosenza</i>	<i>7</i>
3.1.2	<i>Rilevati ferroviari lato Paola – S. Lucido</i>	<i>8</i>
4	INQUADRAMENTO GEOTECNICO E SISMICO	9
4.1	MODELLO GEOTECNICO	9
4.2	INQUADRAMENTO SISMICO	11
4.2.1	<i>Vita Nominale, Classe d'Uso, Tempo di Ritorno</i>	<i>11</i>
4.2.2	<i>Ulteriori parametri sismici.....</i>	<i>13</i>
5	CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE	15
5.1	CRITERI GENERALI DI VERIFICA.....	15
5.2	VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI E FRONTI DI SCAVO	16
5.2.1	<i>Stati limite ultimi (SLU).....</i>	<i>16</i>
5.2.2	<i>Stati limite di esercizio (SLE).....</i>	<i>18</i>
5.3	VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI E FRONTI DI SCAVO	19
5.3.1	<i>Stati limite ultimi (SLU) - Verifica allo stato limite SLV</i>	<i>19</i>
5.3.2	<i>Coefficienti sismici per la verifica di stabilità globale allo SLV</i>	<i>19</i>
6	APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE GEOTECNICHE.....	21
6.1	APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE SLU.....	21

6.2	APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE SLE	22
6.2.1	<i>Consolidazione primaria - Fasi dell'analisi FEM</i>	23
6.2.2	<i>Consolidazione secondaria - Valutazione dei cedimenti tramite formulazione semplificata</i>	24
7	ANALISI DELLE SEZIONI DI CALCOLO	26
7.1	SELEZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO	26
7.2	PARAMETRI GEOTECNICI DEI RILEVATI	26
7.3	CARICHI DI PROGETTO	27
7.4	ANALISI RILEVATO N.1 – IN AFFIANCAMENTO LATO COSENZA IN PROSSIMITA' SCAVALCO A2 ...	29
7.4.1	<i>Analisi di stabilità in condizioni statiche e sismiche</i>	31
7.4.2	<i>Verifica dei cedimenti – modello FEM</i>	36
7.4.2.1	Fasi del modello	36
7.4.2.2	Spostamenti verticali	38
7.4.2.3	Curva cedimenti-tempo	41
7.4.2.4	Cedimento residuo totale	42
7.4.2.5	Cedimenti differenziali del binario esistente	43
7.5	ANALISI RILEVATO N.2 - IN AFFIANCAMENTO LATO PAOLA – P48BP	45
7.5.1	<i>Analisi di stabilità in condizioni statiche e sismiche</i>	48
7.5.2	<i>Verifica dei cedimenti – modello FEM</i>	52
7.5.2.1	Spostamenti verticali	54
7.5.2.2	Curva cedimenti-tempo	57
7.5.2.3	Cedimento residuo totale	58
7.5.2.4	Cedimenti differenziali del binario esistente	58
7.6	ANALISI RILEVATO N.3 - DOPPIO BINARIO LATO PAOLA – P43BP	60
7.6.1	<i>Analisi di stabilità in condizioni statiche e sismiche</i>	62
7.6.2	<i>Verifica dei cedimenti – modello FEM</i>	65
7.6.2.1	Fasi del modello	66
7.6.2.2	Spostamenti verticali	67
7.6.2.3	Curva cedimenti-tempo	69
7.6.2.4	Cedimento residuo totale	70

1 INTRODUZIONE

Nella presente relazione vengono descritti i risultati del calcolo dei cedimenti e delle verifiche di stabilità di rilevati nell’ambito del PFTE – Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica del *Raddoppio della tratta bivio S. Antonello/Castiglione Cosentino - bivio S. Lucido/Paola – Galleria Santomarco*.

L’area di studio ricade nel settore centrale della Regione Calabria e, più precisamente, lungo il margine occidentale dell’Appennino Calabro, nella porzione di territorio compresa tra la costa tirrenica a sud di Paola ed il fondovalle del F. Crati a nord di Rende. Tale areale ricade interamente nella provincia di Cosenza e interessa parte dei territori comunali di Castiglione Cosentino, Montalto Uffugo, Paola, Rende, Rose, San Fili e San Vincenzo la Costa.

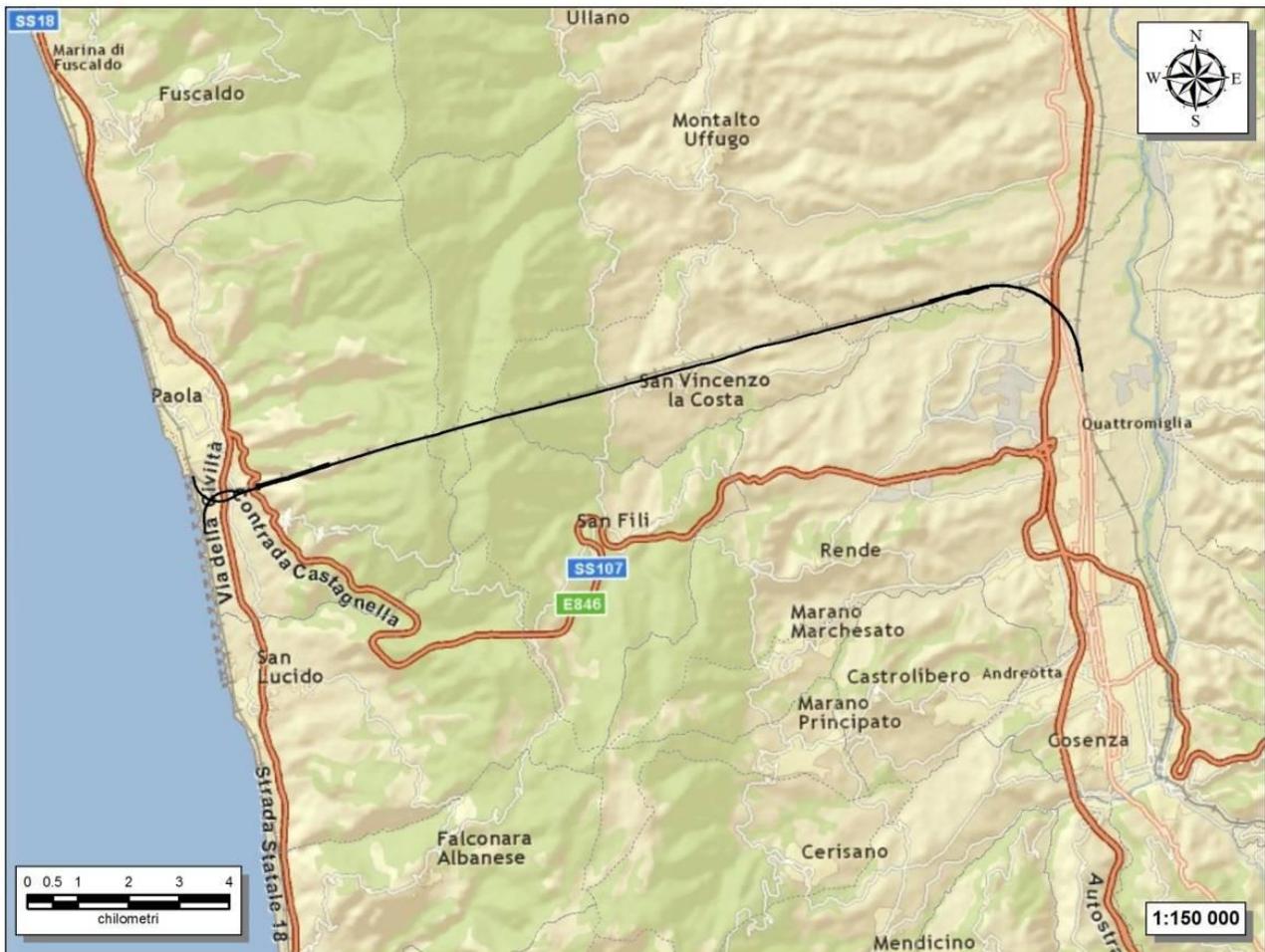


Figura 1.1- Stralcio cartografico in scala 1:150,000 con individuazione del tracciato di progetto (in nero).



LINEA COSENZA – PAOLA S. LUCIDO
NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA
RADDOPPIO COSENZA – PAOLA S. LUCIDO

RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RC1C	03	R 11 RH	GE 00 06 001	A	5 di 71

2 NORMATIVA, BIBLIOGRAFIA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO

- [1] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: “Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n.29 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.30;
- [2] Circolare del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 21 gennaio 2019, n. 7 del Consiglio superiore dei Lavori Pubblici recante “Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;
- [3] RFI DTC SI CS MA IFS 001 del 2021 - “MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI”;
- [4] RFI DTC SI CS SP IFS 004 del 2021- Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Parte II – Sezione 5 – “Opere in terra e scavi” – RFI;
- [5] RFI TCAR ST AR 01 001 D: Standard di qualità geometrica del binario e parametri di dinamica di marcia per velocità fino a 300 km/h
- [6] UNI EN 1997-1: Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali;
- [7] UNI EN 1998-5: Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

2.2 DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

- [8] ITALFERR- Sezioni tipo ferroviarie (Doc.Rif RC1C03R11WBIF0001001-6, 6 tavole);
- [9] ITALFERR – Relazione geotecnica opere all’aperto (Doc.Rif. RC1C03R11GEGE0001001A);
- [10] ITALFERR - Profilo geotecnico (Doc. RC1C03R11LZGE0001001A-5A, 5 tavole);

2.3 SOFTWARE

- [11] Paratie Plus modulo VSP
- [12] Plaxis 2D

3 CARATTERISTICHE DELLE SEZIONI IN RILEVATO

Di seguito una breve descrizione delle caratteristiche delle sezioni in rilevato. Per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati [8]. Tutte le opere incluse in progetto saranno realizzate con i materiali, le prescrizioni e le modalità costruttive descritte nel Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili di RFI [4].

3.1 RILEVATI FERROVIARI

I rilevati ferroviari sono previsti con pendenza 3H:2V e con la realizzazione di una banca intermedia, di larghezza pari a 2 m, dove l'altezza dei rilevati supera i 6.0 m, misurata a partire dal ciglio superiore del rilevato. Al di sotto del rilevato è previsto uno scotico per uno spessore pari a 0.5 m. In Figura 3.1 si riporta una sezione tipologica del rilevato ferroviario tradizionale.

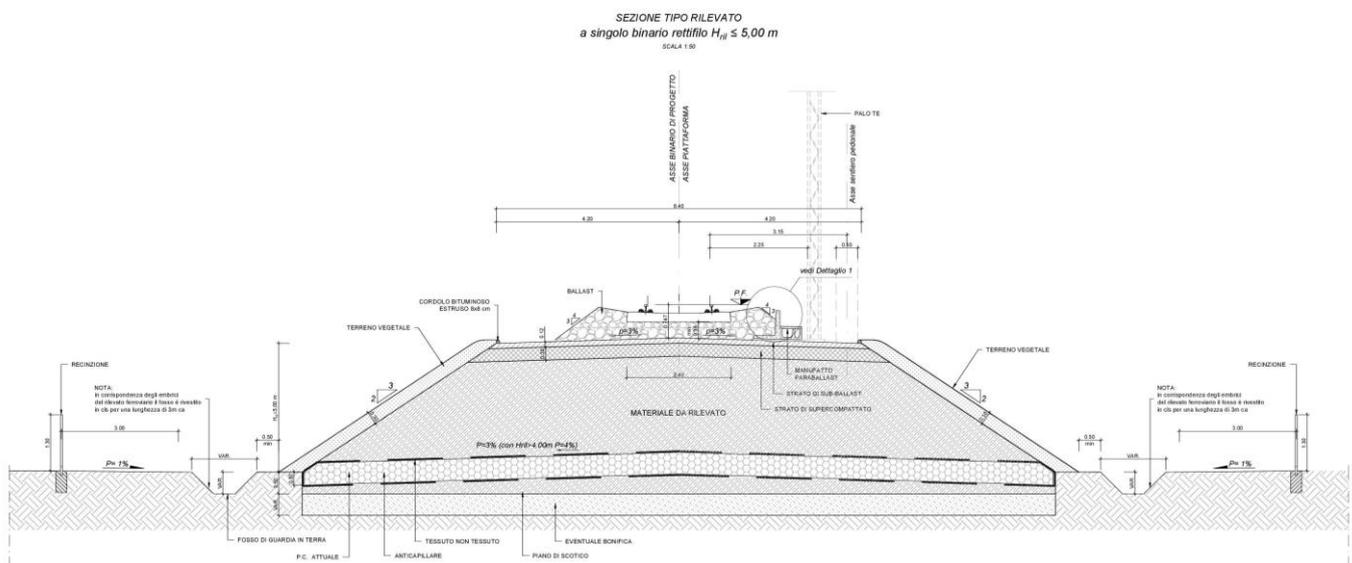


Figura 3.1 Sezione tipo in Rilevato a singolo binario in rettilineo senza barriere antirumore

Come riportato nella sezione tipologica, le scarpate del rilevato sono rifinite con una finitura a verde di spessore pari a circa 30 cm. Il rilevato è finito in sommità con la realizzazione di uno strato di super compattato di spessore pari a 30 cm, al di sopra del quale verrà realizzato uno strato di sub-ballast di spessore pari a 12 cm sul quale verranno posizionati ballast, traversine ed armamento ferroviario.



LINEA COSENZA – PAOLA S. LUCIDO
NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA
RADDOPPIO COSENZA – PAOLA S. LUCIDO

RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RC1C	03	R 11 RH	GE 00 06 001	A	7 di 71

Nelle analisi, la finitura a verde è stata cautelativamente trascurata nei modelli di calcolo, pur sapendo che la stessa fornisce un contributo in termini di coesione allo strato più superficiale delle scarpate. Nelle verifiche di stabilità globale sono state comunque escluse le superfici di scorrimento corticali.

Nel caso di allargamento di un rilevato esistente, previa asportazione dello strato di terreno vegetale umifero, si dovrà ritagliare, con ogni cautela, a gradoni orizzontali la scarpa del corpo del rilevato su cui andrà addossato il nuovo materiale, avendo cura di procedere per fasi, facendo immediatamente seguire ad ogni gradonatura (dell'altezza massima di 50 cm) la stessa del relativo nuovo strato (tale da coprire la gradonatura stessa) ed il suo costipamento, in modo da assicurare comunque la viabilità del rilevato esistente.

3.1.1 Rilevati ferroviari lato Cosenza

Per quanto riguarda i rilevati presenti da lato Cosenza, essi sono in affiancamento alla linea esistente con un'altezza compresa tra 9 e 13 m (tra pc e piano di posa del ballast). Data l'altezza e la vicinanza con il binario esistente, per limitare i cedimenti, sia assoluti, sia indotti sul binario esistente in esercizio, fino alla stazione di Rende si prevede l'utilizzo di rilevati alleggeriti con proporzione 20%(materiale in misto granulare)/80% (argilla espansa) in modo da poter assumere un peso specifico complessivo di $\gamma=7 \text{ kN/m}^3$.

Inoltre, data l'alta sismicità della zona, è previsto l'utilizzo di geogriglie in modo da garantire la stabilità interna del rilevato in condizioni sismiche. Esse sono state ipotizzate con interasse verticale pari a 0.9 m (per poter essere installate all'interno degli strati di materiale in misto granulare) e una lunghezza pari a 9.5 m (pari alla larghezza del nuovo rilevato). La resistenza a trazione stata ipotizzata pari a 100 kN/m.

Per tutti i dettagli relativi ai rilevati si faccia comunque riferimento a quanto contenuto nel Capitolato Tecnico di Appalto RFI (Doc. Rif. [4])



LINEA COSENZA – PAOLA S. LUCIDO
NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA
RADDOPPIO COSENZA – PAOLA S. LUCIDO

RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RC1C	03	R 11 RH	GE 00 06 001	A	8 di 71

3.1.2 Rilevati ferroviari lato Paola – S. Lucido

Per quanto riguarda i rilevati presenti da lato Paola – S.Lucido, essi possono essere in affiancamento alla linea esistente con un'altezza compresa tra 3.80 e 5 m (tra pc e piano di posa del ballast) oppure completamente di progetto e doppio binario (anch'essi con un'altezza compresa tra 3.80 e 5 m tra pc e piano di posa del ballast).

Per questi rilevati, data l'elevata sismicità della zona, si prevede l'utilizzo di rilevati trattati con calce (dettagli e riferimenti presenti nel Capitolato Tecnico di Appalto RFI. (Doc. Rif. [4]) in modo da garantire la stabilità interna in condizioni sismiche e di permettere il riutilizzo di una quota parte di materiali argillosi provenienti dagli scavi, con evidente maggiore beneficio anche dal punto di vista ambientale. Di seguito vengono riepilogati i parametri utilizzati nelle seguenti modellazioni:

- γ = peso specifico = 17 KN/m³
- ϕ' = angolo di attrito interno = 30°
- c' = coesione effettiva= 50 kPa
- c_u =coesione non drenata = 400 kPa
- E = modulo di deformazione = 30 MPa

Per tutti i dettagli relativi ai rilevati si faccia comunque riferimento a quanto contenuto nel Capitolato Tecnico di Appalto RFI. (Doc. Rif. [4])

4 INQUADRAMENTO GEOTECNICO E SISMICO

4.1 MODELLO GEOTECNICO

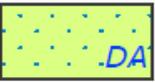
La caratterizzazione geotecnica di riferimento adottata nelle seguenti analisi fa riferimento alla Relazione geotecnica opere all'aperto (Doc [9]). Per l'assetto stratigrafico e la falda si fa riferimento ai Profili geotecnici (Doc [10]).

I parametri geotecnici e il modello stratigrafico di riferimento sono riportati in dettaglio nel capitolo 7, dove vengono riportati i risultati delle analisi dei rilevati.

La falda di progetto, sulla base di quanto riportato nel profilo geotecnico [10], si trova a profondità variabili, in alcune sezioni è così profonda da non essere interferente con le opere mentre in altre si trova più superficiale, a 4-5 m dal piano campagna. L'indicazione della profondità della falda è inclusa nella descrizione di ciascuna sezione analizzata.

Le **unità geotecniche** individuate sono riepilogate nello schema seguente (Doc.[10]).

Tabella 4.1: schema riassuntivo delle unità geotecniche

Unità DA: Depositi Alluvionali (Successioni Continentali Quaternarie)		
	Ghiaie eterometriche, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa	Ghiaie eterometriche, da sub-arrotondate ad arrotondate, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa da scarsa ad abbondante, talora da poco a mediamente cementate; sabbie e sabbie limose a struttura indistinta o laminata, con locali ghiaie eterometriche, da sub-arrotondate ad arrotondate, a luoghi debolmente cementate.
Unità DM: Depositi Marini (Successioni Marine Quaternarie)		
	Ghiaie eterometriche, in matrice sabbiosa e sabbioso-ghiaiosa	Ghiaie eterometriche, da sub-arrotondate ad arrotondate, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa da scarsa ad abbondante, talora da poco a mediamente cementate; sabbie e sabbie limose a stratificazione indistinta o incrociata, con locali ghiaie eterometriche, da sub-arrotondate ad arrotondate, a luoghi debolmente cementate, talora sono presenti livelli di limi argilloso-sabbiosi.
Unità ATS: Argille del Torrente Settimo (Successioni Marine Plio-Pleistoceniche)		
	Argille limose e limi argillosi	Argille limose e limi argillosi grigi e grigio-azzurri, con frequenti intercalazioni millimetriche e centimetriche di sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi; talora sono presenti passaggi decimetrici di sabbie e sabbie limose; a luoghi si rinvencono lenti di ghiaie poligeniche ed eterometriche, da sub-angolose a sub-arrotondate, in matrice sabbioso limosa, da scarsa ad abbondante.

Unità ALD: Argille Marnose (Successioni Marine Mioceniche)

	Argille limose / marnose	Argille limo e argille marnose, in genere sottilmente stratificate, locali livelli di argille nodulari e frequenti intercalazioni millimetriche e centimetriche di sabbie e sabbie limose, a struttura indistinta o laminata. A luoghi si rinvencono intercalazioni di arenarie, calcari e marne, finemente laminate, e lenti di ghiaie poligeniche ed eterometriche in abbondante matrice sabbioso-limosa.
---	--------------------------	---

Di seguito il riepilogo dei parametri delle unità geotecniche.

UNITÀ				
	DA	ATS	DM	ALD
γ [kn/m ³]	19.5	20	20.0	20.5
e[-]	0.6	0.6	0.6	0.5
Ip[%]	na	20	na	30
IC[%]	na	1.1	na	1.5
ϕ [°]	30 ÷ 35	25.0÷27	30-38	22 ÷ 26
c' [kPa]	0 ÷ 10	20 ÷ 25	0 ÷ 5	10 ÷ 40
cu [kPa]	na	100-220	na	200-300
Eyoung [MPa]	z<10: 20 10<z<30: 35	z<15: 15 15<z<45: 25	z<10: 30 z>10: 45	z<10: 20 10<z<25: 40 z>25: 60
K [m/s]	1.0E-06	5.0E-08	2.0E-6	5.0E-08
OCR	na	1.5	na	1.5
Cc	na	0.216	na	0.158
Cs	na	0.076	na	0.052
C _{ae}	na	Vedi Rel. geotec [9]	na	Vedi Rel. geotec [9]

4.2 INQUADRAMENTO SISMICO

L'azione sismica che governa il rispetto dei diversi Stati Limite per le strutture in progetto (di Esercizio – SLE e Ultimi - SLU) è qui definita in accordo alle Norme Tecniche 2018 (NTC2018), a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione, espressa in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sottosuolo rigido, con superficie topografica orizzontale.

La definizione dell'azione sismica include le ordinate dello spettro di risposta elastico di accelerazione $S_e(T)$ corrispondenti a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} nel periodo di riferimento V_R per la vita utile della struttura.

In sintesi, la forma degli spettri di risposta di progetto (considerati su sottosuolo rigido di riferimento) è definita dai seguenti parametri:

- a_g accelerazione orizzontale massima per sito rigido e superficie topografica orizzontale;
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_c^* periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Nei paragrafi seguenti verrà dapprima stabilito il periodo di riferimento per l'azione sismica (V_R), in base alla classificazione delle opere in progetto.

4.2.1 Vita Nominale, Classe d'Uso, Tempo di Ritorno

La Vita Nominale V_N di un'opera, intesa come il periodo temporale entro cui l'opera stessa può essere usata per lo scopo al quale è destinata purché soggetta alla manutenzione ordinaria, è così definita dalle NTC2018:

- $V_N \leq 10$ anni, per opere provvisorie e opere provvisionali;
- $V_N \geq 50$ anni, per opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale;
- $V_N \geq 100$ anni, per grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di importanza strategica.



LINEA COSENZA – PAOLA S. LUCIDO
NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA
RADDOPPIO COSENZA – PAOLA S. LUCIDO

RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RC1C	03	R 11 RH	GE 00 06 001	A	12 di 71

Nel caso in esame, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto è stato assunto in sede progettuale, con riferimento al manuale di progettazione RFI 2021, il valore di vita nominale per linee a velocità $V < 250 \text{ km/h}$:

$$V_N = 75 \text{ anni}$$

Le opere sono suddivise dalle NTC2018 in classi d'uso, la cui appartenenza è stabilita sulla base dell'importanza dell'opera rispetto alle esigenze di operatività a valle di un evento sismico. In particolare, le classi d'uso sono così definite:

- Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli. Per le quali si ha un coefficiente d'uso $C_U = 0.7$.
- Classe II: ... *omissis* ... Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o Classe d'uso IV, salvo casi particolari per i quali sia necessaria la classe d'uso III o IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza ... *omissis* Per le quali $C_U = 1.0$.
- Classe III: ... *omissis* ... Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV, salvo casi particolari per i quali sia necessaria la classe d'uso IV, e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza ... *omissis* ... Per le quali $C_U = 1.5$.
- Classe IV: ... *omissis* ... Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade" e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico ... *omissis* ... Per le quali $C_U = 2$.

Nel caso in esame si assume:

Classe d'uso III ($C_U = 1.5$) per la linea ferroviaria;

Classe d'uso IV ($C_U = 2$) per le opere connesse all'attraversamento dell'autostrada

Pertanto, nel caso in esame, l'azione sismica di verifica viene associata ad un periodo di riferimento pari a:

$$V_R = V_N \times C_U = 75 \times 1.5 = 112.5 \text{ anni per la linea ferroviaria;}$$

$$V_R = V_N \times C_U = 75 \times 2.0 = 150 \text{ anni per le opere connesse all'attraversamento dell'autostrada}$$

4.2.2 Ulteriori parametri sismici

Per ulteriori dettagli circa l'inquadramento sismico, quali l'accelerazione di riferimento su suolo rigido, la risposta sismica locale (con particolare riferimento alla categoria di sottosuolo e al fattore di amplificazione sismica), si rimanda a quanto descritto nel capitolo 3 della Relazione Geotecnica, Doc.Rif. [9]. Per completezza, si riporta la suddivisione del tracciato in funzione della categoria di sottosuolo.

Tabella 4.2 Suddivisione del tracciato in funzione della categoria di sottosuolo

Area tracciato	Categoria di suolo
Tracciato Lato Cosenza	C
Tracciato Lato Paola	B
Attraversamento A2	C

Di seguito si indica il riepilogo dei parametri sismici per le diverse tratte:

Tabella 4.3 Riepilogo parametri sismici tratta lato Cosenza

	Lato Cosenza				Scavalco autostrada			
	Ss [-]	St [-]	a _{max} [m/s ²]	a _{max} [g]	Ss [-]	St [-]	a _{max} [m/s ²]	a _{max} [g]
SLO	1.500	1.000	1.609	0.164	1.500	1.000	1.854	0.189
SLD	1.500	1.000	2.077	0.212	1.470	1.000	2.342	0.239
SLV	1.140	1.000	4.201	0.428	1.080	1.000	4.424	0.451
SLC	1.000	1.000	4.803	0.490	1.000	1.000	5.022	0.512

Tabella 4.4 Riepilogo parametri sismici tratta lato Paola – S. Lucido

Lato Paola				
	Ss [-]	St [-]	a _{max} [m/s ²]	a _{max} [g]
SLO	1.200	1.000	0.968	0.099
SLD	1.200	1.000	1.232	0.126
SLV	1.130	1.000	2.976	0.303
SLC	1.040	1.000	3.561	0.363

5 CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE

5.1 CRITERI GENERALI DI VERIFICA

Per le opere in esame sono svolte le seguenti verifiche (par. 6.2.4. del Doc. [1]):

- Verifiche agli Stati Limite Ultimi (SLU);
- Verifiche agli Stati Limite d'Esercizio (SLE).

Per ogni **Stato Limite Ultimo (SLU)** deve essere rispettata la condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove:

E_d = valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione;

R_d = valore di progetto della resistenza.

La verifica della condizione $E_d \leq R_d$ deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A1 e A2), per i parametri geotecnici (M1 e M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3). I coefficienti da adottarsi nelle diverse combinazioni sono definiti in funzione del tipo di verifica da effettuare (si vedano i paragrafi seguenti). Si sottolinea che per quanto concerne le azioni di progetto E_d tali forze possono essere determinate applicando i coefficienti parziali di cui sopra alle azioni caratteristiche, oppure, a posteriori, sulle sollecitazioni prodotte dalle azioni caratteristiche (Par. 6.2.4.1 del Doc. [1]).

Per ogni **Stato Limite d'Esercizio (SLE)** deve essere rispettata la condizione:

$$E_d \leq C_d$$

dove:

E_d = valore di progetto dell'effetto dell'azione;

C_d = valore limite prescritto dell'effetto delle azioni (definito Progettista Strutturale).

La verifica della condizione $E_d \leq C_d$ deve essere effettuata impiegando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici dei materiali.

5.2 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI E FRONTI DI SCAVO

In base a quanto indicato dalle NTC 2018 (Doc. [1]) le verifiche di sicurezza che devono essere condotte per opere costituite da materiali sciolti e per i fronti di scavo sono le seguenti:

5.2.1 Stati limite ultimi (SLU)

Le verifiche di stabilità in campo statico di opere in materiali sciolti e fronti di scavo devono essere eseguite secondo il seguente approccio (Par. C.6.8.6 Doc. [2]):

Approccio 1 - Combinazione 2 - A2 + M2 + R2

tenendo conto dei coefficienti parziali sotto definiti.

La verifica di stabilità globale si ritiene soddisfatta se:

$$\frac{R_d}{E_d} \geq 1 \Rightarrow \frac{1}{\gamma_R} \cdot R \geq 1 \Rightarrow \frac{R}{E_d} \geq \gamma_R$$

essendo R resistenza globale del sistema calcolata sulla base delle azioni di progetto, dei parametri di progetto e della geometria di progetto.

Facendo riferimento a quanto previsto al p.to 3.5.2.3.8 del Doc Rif. [3], per le verifiche agli stati limite ultimi si adottano i valori dei coefficienti parziali sulle azioni in Tabella 5.1 (Tab. 5.2.V del Doc. [1]).

I carichi variabili da traffico ferroviario da utilizzare nelle verifiche di stabilità saranno quelli dovuti al treno di carico LM71, senza incremento dinamico.

Tabella 5.1: coefficienti parziali sulle azioni (Tab. 5.2.I del Doc. Rif. [1])

Tab. 5.2.V - Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU

Coefficiente			EQU ⁽¹⁾	A1	A2
Azioni permanenti	favorevoli	γ_{G1}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,10	1,35	1,00
Azioni permanenti non strutturali ⁽²⁾	favorevoli	γ_{G2}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Ballast ⁽³⁾	favorevoli	γ_B	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Azioni variabili da traffico ⁽⁴⁾	favorevoli	γ_Q	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,45	1,45	1,25
Azioni variabili	favorevoli	γ_{Qi}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Precompressione	favorevole	γ_P	0,90	1,00	1,00
	sfavorevole		1,00 ⁽⁵⁾	1,00 ⁽⁶⁾	1,00
Ritiro, viscosità e cedimenti non imposti appositamente	favorevole	γ_{Ce}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevole		1,20	1,20	1,00

In Tabella 5.1 il significato dei simboli è il seguente:

- γ_{G1} coefficiente parziale del peso proprio della struttura, del terreno e dell'acqua, quando pertinente;
- γ_{G2} coefficiente parziale dei pesi propri degli elementi non strutturali;
- γ_B coefficiente parziale del peso proprio del ballast;
- γ_Q coefficiente parziale delle azioni variabili da traffico;
- γ_{Qi} coefficiente parziale delle azioni variabili.

I coefficienti parziali sui materiali risultano i seguenti (Tab. 6.2.II del Doc. [1]):

Tabella 5.2: coefficienti parziali sui terreni (M1 ed M2)

PARAMETRO	Coefficiente parziale	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	γ_e'	1.0	1.25
Coesione efficace	γ_e'	1.0	1.25
Resistenza non drenata	γ_{Cu}	1.0	1.4
Peso dell'unità di volume	γ_r	1.0	1.0

I coefficienti parziali sulle resistenze risultano i seguenti (Tab. 6.8.I del Doc. [1]):

Tabella 5.3: coefficienti parziali sulle resistenze (R2)

Tab. 6.8.I - Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo

COEFFICIENTE	R2
γ_R	1,1

5.2.2 Stati limite di esercizio (SLE)

Per i rilevati deve essere verificato che i cedimenti dell'opera e del terreno sottostante siano compatibili con la funzionalità dell'infrastruttura. Devono essere valutati sia i cedimenti immediati, sia quelli dovuti agli effetti della consolidazione primaria ed eventualmente a quella secondaria, ed il loro andamento nel tempo, in funzione delle caratteristiche dei terreni che costituiscono il terreno di fondazione.

Per i rilevati deve essere verificato in condizione SLE, mediante analisi effettuate impiegando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici dei materiali (Par. 6.5.3.2 del Doc. Rif. [1]), che gli spostamenti dell'opera in esame e del terreno circostante siano compatibili con la funzionalità della struttura e con la sicurezza e la funzionalità dei manufatti adiacenti.

Nello specifico, come riportato nel Manuale di progettazione RFI, è stabilito, per i rilevati ferroviari, un valore soglia dei cedimenti residui attesi (a far data dal completamento del piano di posa del ballast), corrispondenti ad uno Stato Limite di Esercizio (SLE), pari a 5 cm. Tale valore limite è stato assunto facendo riferimento nelle analisi a un arco temporale di 20 anni, corrispondente al tempo entro il quale è generalmente previsto il rinnovo dell'armamento ferroviario.

Nell'eventualità di costruzione dell'opera in concomitanza di esercizio ferroviario adiacente, dovrà esser inoltre verificato il rispetto degli *standard* di qualità geometrica del binario, in ottemperanza a quanto riportato nel Doc. [3]. In particolare, dovrà esser verificato il Livello Trasversale XL, definito come nel Doc. [3], in modo che il cedimento differenziale tra le due rotaie sia minore di 10 mm.

5.3 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI E FRONTI DI SCAVO

5.3.1 Stati limite ultimi (SLU) - Verifica allo stato limite SLV

Per tutte le verifiche, l'azione sismica di progetto deve essere valutata sulla base degli Stati Limite relativi all'opera da verificare (vedasi Doc. [1]). Per le opere in oggetto, le verifiche agli Stati Limite Ultimi verranno condotte con riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV).

Le verifiche di sicurezza agli SLU in campo sismico devono contemplare la stabilità globale in condizioni sismiche delle opere in materiali sciolti, quali rilevati, e fronti di scavo che deve essere svolta ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a $\gamma_R = 1.2$ (vedasi Par.7.11.4 del Doc. [1]).

Come riportato al Par. 7.11.4 del Doc. [1] le verifiche possono essere condotte mediante metodi pseudostatici.

Inoltre, in condizioni sismiche, il coefficiente di combinazione ψ per il carico variabile da traffico ferroviario, da utilizzare nelle verifiche agli stati limite ultimi, deve essere posto pari a 0.2. Per analogia, tale coefficiente verrà adottato anche relativamente al carico variabile da traffico stradale.

5.3.2 Coefficienti sismici per la verifica di stabilità globale allo SLV

Come descritto al Par. C7.11.4 del Doc. [2], la verifica di stabilità globale va condotta mediante il metodo di analisi definito al Par. 7.11.3.5 del Doc. [1] inerente alla stabilità dei pendii.

Sulla base di quanto definito al Par.7.11.3.5.2 del Doc. Rif. [1], in mancanza di studi specifici, i coefficienti sismici k_h (orizzontale) e k_v (verticale) sono definiti come:

$$k_h = \beta_s a_{\max}/g$$

$$k_v = \pm k_h / 2$$

essendo a_{max} l'azione sismica di progetto, pari al prodotto tra la massima accelerazione alla base a_g ed il coefficiente S a sua volta pari al prodotto tra il coefficiente stratigrafico S_s ed il coefficiente topografico S_T .

Il coefficiente β_s di riduzione dell'accelerazione massima è pari a 0.38 per verifiche allo SLV di fronti di scavo o rilevati (Doc. [1]).

Nei casi in esame pertanto si ha, sulla base delle categorie di sottosuolo individuate al par. 4.2.2., i seguenti parametri sismici:

Tabella 5.4: parametri sismici rilevati.

STATO LIMITE	Punto	T_R , anni	a_{max} [m/s]	a_{max} [g]	K_h (-)	K_v (-)
SLV	Lato Cosenza	1068	4.201	0.428	0.163	0.082
	Lato Paola	1068	2.976	0.303	0.115	0.058
	Scavalco	1424	4.424	0.451	0.171	0.086

6 APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE GEOTECNICHE

6.1 APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE SLU

Le verifiche geotecniche allo Stato Limite Ultimo riguardano il calcolo della stabilità globale dei rilevati. Per le opere definitive sono state condotte verifiche sia in condizioni statiche che in condizioni sismiche.

L'esame delle condizioni di stabilità dei rilevati e trincee è stato condotto utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite. Il coefficiente di sicurezza a rottura lungo la superficie di scorrimento viene definito come rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie e quella effettivamente mobilitata:

$$F_s = \frac{T_{disp}}{T_{mob}}$$

Il codice VSP implementato in Paratie Plus è stato utilizzato nel presente documento per condurre le analisi di stabilità, sia in campo statico sia in campo sismico (adottando il metodo pseudo-statico), per le verifiche richieste dalla Normativa per le opere in terreni sciolti e fronti di scavo.

Il modulo VSP di Paratie Plus permette di calcolare la stabilità complessiva di un versante, di un fronte di scavo o di un rilevato in cui può o meno essere presente un'opera di sostegno flessibile. Paratie Plus utilizzando i metodi dell'equilibrio limite, prevede la possibilità di scegliere diversi metodi di analisi e permette di prendere in considerazione superfici di scorrimento definite con metodologie differenti.

In particolare, prevede il calcolo della stabilità per mezzo dei seguenti metodi:

- Metodo di Bishop semplificato;
- Metodo di Janbu semplificato;
- Metodo di Morgenstern & Price.

Tutti questi si basano sull'individuare una porzione di terreno instabile mobilitata lungo una potenziale superficie di scorrimento, suddividendo la regione di terreno mobilitata in conci verticali compresi tra la sommità del terreno e la superficie di scorrimento e applicando le condizioni di equilibrio generali e relative ai singoli conci. Poiché nella scrittura delle condizioni di equilibrio del singolo concio è necessario includere le azioni che esso scambia con i conci adiacenti, si ottiene un sistema risolvibile in cui le incognite (il coefficiente di sicurezza e le azioni interne fra i conci) superano le equazioni

	LINEA COSENZA – PAOLA S. LUCIDO NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA RADDOPPIO COSENZA – PAOLA S. LUCIDO					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA RC1C	LOTTO 03	CODIFICA R 11 RH	DOCUMENTO GE 00 06 001	REV. A

disponibili. La differenza fra i diversi metodi risiede nel modo in cui il problema viene reso staticamente determinato; in generale vengono introdotte ulteriori ipotesi, diverse da un metodo all'altro, relativamente alle azioni di interazione fra conci adiacenti.

Nelle analisi effettuate si è fatto riferimento al metodo di Morgenstern & Price che ipotizza che l'inclinazione delle forze tra i conci vari con la posizione x del concio, secondo una legge $f(x)$ nota a meno di un moltiplicatore λ introdotto come variabile aggiuntiva. Il coefficiente di sicurezza è ottenuto imponendo condizioni di equilibrio generali sia alla traslazione sia alla rotazione. Il metodo non richiede che la superficie di scorrimento sia un arco di cerchio.

Per la definizione delle superfici da analizzare, invece, Paratie Plus offre la possibilità di scegliere tra le seguenti metodologie:

- Archi di cerchio aventi centro noto e raggi compresi in un intervallo;
- Archi di cerchio entranti e uscenti in posizioni note;
- Griglia dei centri e limiti geometrici sui raggi;
- Superficie di scorrimento generica definita tramite una spezzata.

Per le analisi dei rilevati è stato utilizzato il secondo metodo e pertanto è stato definito un intervallo di entrata (a monte), uno di uscita (a valle) e il raggio massimo. Sulla base di questi intervalli il programma ha generato diversi archi di cerchio contraddistinti ovviamente da diversi centri. Sono state escluse, perché considerate non significative, le superfici di rottura corticali.

6.2 APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE SLE

Le verifiche geotecniche allo Stato Limite di Esercizio hanno riguardato il calcolo dei cedimenti del rilevato ferroviario. A tal scopo sono state considerate le sezioni ritenute più rappresentative per la tratta in esame.

Date le caratteristiche geotecniche dell'area sono stati valutati per mezzo di analisi FEM i cedimenti di consolidazione primaria e poi, se necessario, i cedimenti secondari con formulazione analitica, nel

	LINEA COSENZA – PAOLA S. LUCIDO NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA RADDOPPIO COSENZA – PAOLA S. LUCIDO					
	RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI	COMMESSA RC1C	LOTTO 03	CODIFICA R 11 RH	DOCUMENTO GE 00 06 001	REV. A

caso la caratterizzazione geotecnica abbia evidenziato la presenza di Argille Attive, come riportato nel Doc. Rif. [9].

Per i materiali granulari è stato adottato il legame costitutivo di Mohr Coulomb (MC), mentre per i materiali coesivi è stato introdotto il legame costitutivo Soft Soil (SS), dove il comportamento in termini di rigidità del materiale è descritto dai parametri geotecnici C_c e C_s .

6.2.1 Consolidazione primaria - Fasi dell'analisi FEM

Il calcolo della consolidazione primaria mediante analisi FEM dei rilevati avviene per fasi, differenti in ciascuna sezione analizzata e dipendenti principalmente dalla geometria del nuovo rilevato e dalla presenza di altre strutture esistenti.

Per la modellazione delle sezioni di rilevati è stata adottata la seguente procedura in termini generali:

- Fase geostatica di inizializzazione del modello;
- Fasi di applicazione degli eventuali carichi esistenti e consolidazione a 50 anni dei rilevati esistenti, se presenti;
- Fasi di costruzione del rilevato in strati di 1 – 1.5 m d'altezza (ogni sottofase di costruzione di durata 10 giorni) e consolidazione fino a 9 mesi;
- Fase di applicazione del carico dovuto al pacchetto di armamento ferroviario del nuovo rilevato (in caso di rilevato ferroviario) in 1 giorno; a partire dall'inizio di questa fase, ha inizio il calcolo del cedimento residuo
- Fase di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 6 mesi,;
- Fase di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 1 anno;
- Fase di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 2 anni;
- Fase di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 5 anni;
- Fase di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 10 anni;
- Fase di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 20 anni.



LINEA COSENZA – PAOLA S. LUCIDO
NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA
RADDOPPIO COSENZA – PAOLA S. LUCIDO

RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RC1C	03	R 11 RH	GE 00 06 001	A	24 di 71

6.2.2 Consolidazione secondaria - Valutazione dei cedimenti tramite formulazione semplificata

Stante la natura dei materiali coesivi incontrati, laddove la possibilità di sviluppo di cedimenti secondari non sia ritenuta trascurabile, al contributo di cedimento residuo dovuto alla consolidazione primaria calcolato con il modello ad elementi finiti con il codice di calcolo Plaxis sono stati poi sommati quelli dovuti alla consolidazione secondaria.

Tale contributo è stato valutato tenendo su uno spessore coerente con gli incrementi tensionali indotti dalla realizzazione del rilevato e dalla successiva applicazione dei sovraccarichi (ballast per le opere ferroviarie, sovrastruttura stradale per le opere stradali).

In particolare, la variazione rispetto alle condizioni geostatiche è stata valutata in corrispondenza della fase di applicazione del ballast, considerando come profondità di influenza la larghezza del nuovo rilevato (assunzione valida per rilevati “standard” analizzati in questo documento).

Per la valutazione dei cedimenti secondari legati alla componente viscosa dei terreni è stata adottata la seguente procedura:

- Valutazione del tempo di inizio consolidazione secondaria sulla base della curva cedimenti tempo, in corrispondenza del tempo in cui si è esaurito completamente il cedimento primario (t_{100}).
- Definizione dello spessore di calcolo corrispondente alla profondità di terreno sino alla quale il rapporto $\Delta\sigma_v$ risulta circa 15% della tensione geostatica iniziale. Si è verificato che grossomodo questo spessore è approssimabile alla larghezza dell'impronta del rilevato.

Per il calcolo dei cedimenti secondari, è stato fatto riferimento alle prove di laboratorio specifiche per le unità geotecniche in esame. Per ulteriori approfondimenti si rimanda al documento citato e a quanto riportato nella relazione geotecnica (Rif. Doc. [9])

Il calcolo dei cedimenti dovuti a fenomeni viscosi avviene per mezzo della seguente equazione:

$$s_s = \sum_1^n \log\left(\frac{t}{t_{100j}}\right) \cdot c_{\alpha\alpha,j} \cdot h_i$$

essendo:



LINEA COSENZA – PAOLA S. LUCIDO
NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA
RADDOPPIO COSENZA – PAOLA S. LUCIDO

RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RC1C	03	R 11 RH	GE 00 06 001	A	25 di 71

- s_s = cedimento secondario (m);
- t = tempo generico a partire dall'applicazione del carico (s); si assume il tempo già assunto per la valutazione dei cedimenti primari, ovvero $t = 20$ anni;
- $t_{100,i}$ = tempo a partire dal quale si calcolano i cedimenti indotti da consolidazione secondaria, secondo il criterio di cui sopra;
- h_i = altezza dello strato i -esimo di terreno interessato da consolidazione secondaria (m);
- n = numero di strati di terreno interessato da consolidazione secondaria (-);
- $C_{\alpha,\varepsilon}$ = coefficiente di consolidazione secondaria nello strato i -esimo.

In presenza di più strati interessati potenzialmente da consolidazione secondaria, saranno utilizzati i valori dei coefficienti $C_{\alpha,\varepsilon}$, mediando il valore sullo spessore degli strati di terreno coinvolti.

7 ANALISI DELLE SEZIONI DI CALCOLO

7.1 SELEZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO

Per l'esecuzione delle verifiche sono state selezionate 3 sezioni in rilevato ferroviario **ritenute le maggiormente rappresentative in funzione dell'assetto stratigrafico e della geometria della sezione.**

Con riferimento alle unità geotecniche presenti ed alla posizione della falda di progetto, si è deciso di eseguire le analisi sulle seguenti sezioni:

Tabella 7.1: rilevati ferroviari e stradali - sezioni di analisi.

Sezione	Progressiva indicativa	Altezza rilevato (m)	Unità geotecnica a piano di posa rilevato	Paragrafo
1 - rilevato ferroviario in approccio allo scavalco dell'autostrada A2	D11 – pk1+000 P11 – pk 1+361	11.5	DA	7.4
2 – rilevato ferroviario in affiancamento	P48 – pk 10+655	5.10	DM	7.5
3 – rilevato ferroviario a doppio binario	P43 – pk 20+153	4.75	DM	7.6

I parametri geotecnici sono riassunti per ogni analisi svolta nel corrispondente paragrafo, in base alla caratterizzazione geotecnica contenuta nella Relazione Geotecnica, Doc.Rif. [9].

7.2 PARAMETRI GEOTECNICI DEI RILEVATI

Per i rilevati vengono considerati i parametri geotecnici riportati nella tabella seguente, secondo quanto indicato dal Manuale di Progettazione RFI (Doc. Rif [3]). Si fa notare, come già anticipato, che per i nuovi rilevati in affiancamento lato Cosenza si è considerato l'impiego di rilevati alleggeriti con proporzione 20% (materiale da rilevato)/80% (argilla espansa) in modo da poter assumere complessivamente $\gamma=7$ kN/m³, in maniera tale da ridurre i cedimenti indotti sulla linea esistente. Per i rilevati lato Paola si prevede l'utilizzo di rilevati trattati a calce per garantire la stabilità interna in condizioni sismiche.

Nella **Tabella 7.2** seguente sono riepilogati i parametri utilizzati per i diversi tipi di rilevati.

Tabella 7.2: Parametri geotecnici per i rilevati

Strato	Legame costitutivo	γ	ϕ'	c'	E'
[-]	[-]	[kN/m ³]	[°]	[kPa]	[MPa]
Rilevati ferroviari di nuova realizzazione lato Paola, con trattamento a calce	Mohr Coulomb	17	30	50	30
Rilevati ferroviari di nuova realizzazione lato Cosenza, in materiale alleggerito	Mohr Coulomb	7	38	0	30
Rilevati ferroviari esistenti	Mohr Coulomb	20	35	0	30

7.3 CARICHI DI PROGETTO

I carichi di progetto considerati nelle analisi delle opere ferroviarie del presente documento sono i seguenti:

- Carico rappresentativo del pacchetto di armamento ferroviario (ballast, traversine, rotaie); tale carico è considerato in tutte le verifiche dei rilevati (SLE, SLU, SLV);
- Sovraccarico rappresentativo del traffico ferroviario; tale carico è considerato nelle verifiche di stabilità globale SLU e SLV dei rilevati; nelle verifiche SLE, concordemente con quanto riportato nel manuale di progettazione RFI, non si considera il sovraccarico ferroviario;
- Azione sismica per le analisi di stabilità: tale carico è considerato solamente nelle verifiche dei rilevati allo SLV.

L'armamento ferroviario, come da Manuale di Progettazione (Doc. [3]), è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14.4 kPa, rappresentativo di uno strato di spessore pari a circa 0.80 m con un peso pari a 18.0 kN/m³. Il carico è stato applicato sulla sommità del rilevato su una fascia di larghezza pari a 5.4 m per ogni binario ferroviario.

Il sovraccarico da traffico ferroviario è stato valutato, in accordo a quanto riportato nel Doc. [3], considerando il treno di carico LM71 (con $\alpha=1.1$) che per i casi in esame risulta essere più gravoso rispetto al treno di carico SW2. In particolare, si è fatto riferimento ai quattro assi da 250 kN disposti ad interasse di 1.60 m e pertanto si è considerato un carico di $\alpha \cdot Q_{vk}/i = 1.1 \cdot (4 \cdot 250) / (4 \cdot 1.6) = 171.88$ kN/m. Per riportare tale carico dalla traversina, di larghezza pari a 2.4 m, al piano al di sotto dell'armamento si è considerata una diffusione con pendenza 45° su un'altezza di 40 cm. Pertanto, la pressione equivalente per ogni linea ferroviaria è stata considerata applicata su una fascia di larghezza pari a 3.2 m, centrata in corrispondenza dell'asse della linea ferroviaria, e pari a 53.71 kPa.

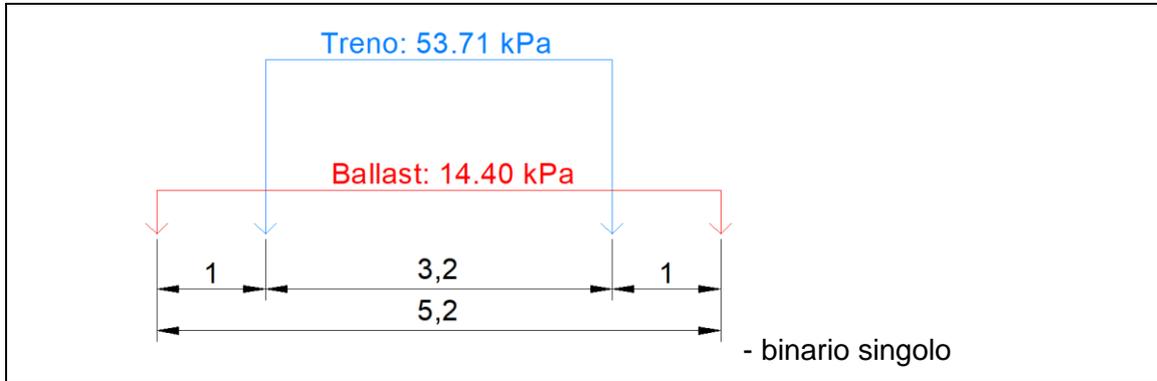


Figura 7.1: diagramma di applicazione del sovraccarico del ballast e del traffico ferroviario.

Per la definizione dell'azione sismica di progetto si rimanda al paragrafo 5.3.2 del presente documento.

7.4 ANALISI RILEVATO N.1 – IN AFFIANCAMENTO LATO COSENZA IN PROSSIMITA' SCAVALCO A2

La geometria utilizzata è mostrata nella figura seguente. Il nuovo rilevato raggiunge un'altezza di 11.5 m ed è realizzato con scarpate di pendenza 3H:2V; la sezione di riferimento è alla progressiva 1+000 (BP). Tale rilevato poggia sul rilevato esistente (quest'ultimo con linea ferroviaria a singolo binario in esercizio) come da sezione riportata nella figura successiva. La sezione in oggetto è stata analizzata come rappresentativa (in termini di massima altezza del rilevato) delle condizioni di affiancamento alla linea ferroviaria esistente al fine di valutare gli effetti del nuovo rilevato su quello esistente, per il lato Cosenza.

Nella Figura 7.2 seguente è riportata la sezione di analisi, Il rilevato in affiancamento è previsto in materiale alleggerito (come detto già al par. 4) con geogriglie (nella figura è indicato con il tratteggio questi tipi di intervento, per maggiori dettagli si rimanda alle tavole di sezioni tipo [8]). La scelta progettuale è dettata dalla necessità di minimizzare il peso aggiuntivo gravante sul rilevato esistente e ridurre dunque l'entità dei cedimenti indotti sul binario esistente in esercizio

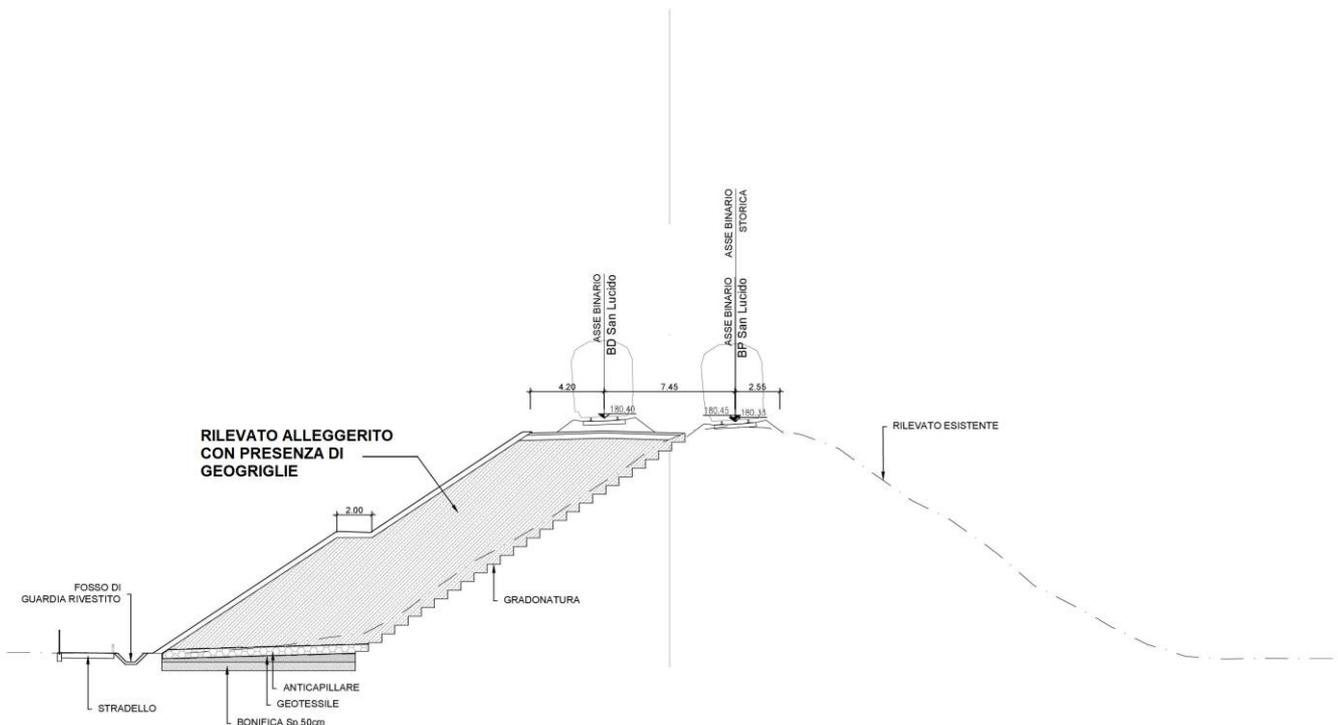


Figura 7.2 Sezione rilevato in affiancamento lato Cosenza – Scavalco A2

Il modello geotecnico è rappresentato dalla successione stratigrafica caratterizzata dai parametri meccanici sintetizzati nella seguente Tabella 7.3 (vedi anche relazione geotecnica [9]). La falda di progetto si trova 4.5 m di profondità dal piano campagna secondo il profilo geotecnico (Doc. Ref [10]).

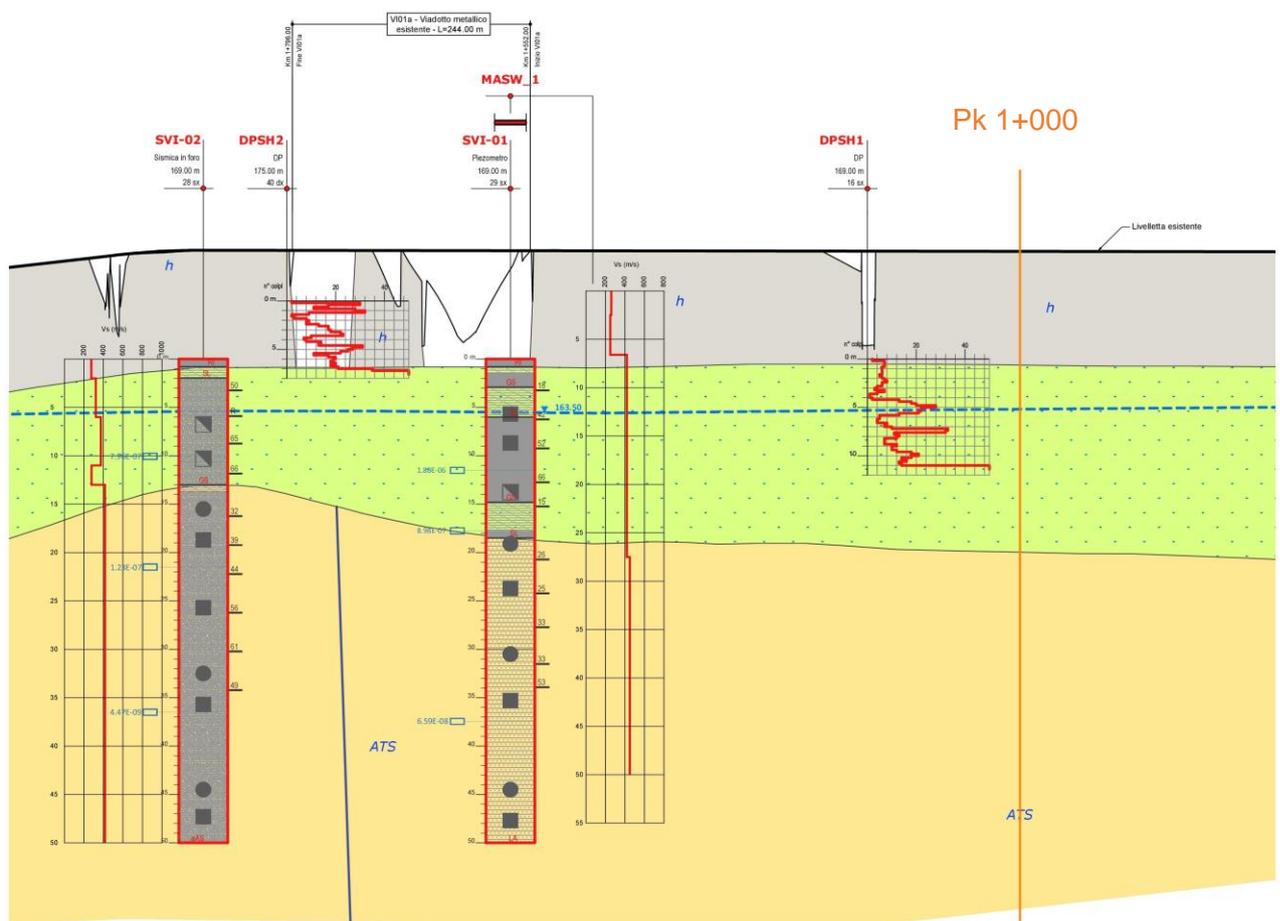


Figura 7.3: sezione rilevato 1+000 nel profilo geotecnico (linea arancione).

Le caratteristiche dei materiali da costruzione dei rilevati assunte in progetto sono conformi a quanto previsto nel Manuale di Progettazione RFI e nel Capitolato di Costruzione RFI (Doc. Rif [3][4]). Secondo il profilo geologico, in questa sezione sono stati considerati i seguenti materiali:

U.G.	Legame	Profondità strato	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ' (°)	k (m/s)	E' (MPa)	ν (-)	C_c	C_s	e_{init}	OCR
Rilevato esistente	MC	-	20.0	0	35	5.0 E-5	30	0.30	-	-	-	-
Rilevato nuovo	MC	-	7.0	0	38	5.0 E-5	30	0.30	-	-	-	-
DA 0-10m	MC	0-10m	19.5	0	33	1.0 E-6	20	0.30	-	-	-	-
DA >10m	MC	10-18	19.5	0	33	1.0 E-6	35	0.30	-	-	-	-
ATS	SS	>18	20.0	20	25	5.0 E-8	-	0.30	0.216	0.076	0.6	1.5

Tabella 7.3: parametri geotecnici caratteristici.

Con riferimento alla tabella anteriore, i parametri C_c e C_s del materiale ATS si riferiscono rispettivamente all'indice di compressibilità ed all'indice di scarico.

Come definito nella relazione Geotecnica (doc.Rif. [9]), per l'unità DA (presente fino a 18 m dal piano di posa del rilevato), per l'analisi dei cedimenti, ai 10 primi metri di profondità è stato assegnato un valore di modulo elastico E' pari a 20 MPa; a profondità maggiori invece si è considerato un E' di 35 MPa.

7.4.1 Analisi di stabilità in condizioni statiche e sismiche

In Figura 7.4 è riportata un'immagine del modello di calcolo.

Si fa notare che nonostante i parametri ed i carichi riportati nelle figure corrispondano a quelli con coefficiente unitario, il programma Paratie Plus applica direttamente (i.e. internamente al programma) i coefficienti secondo il codice NTC2018, come spiegato nel capitolo 5.

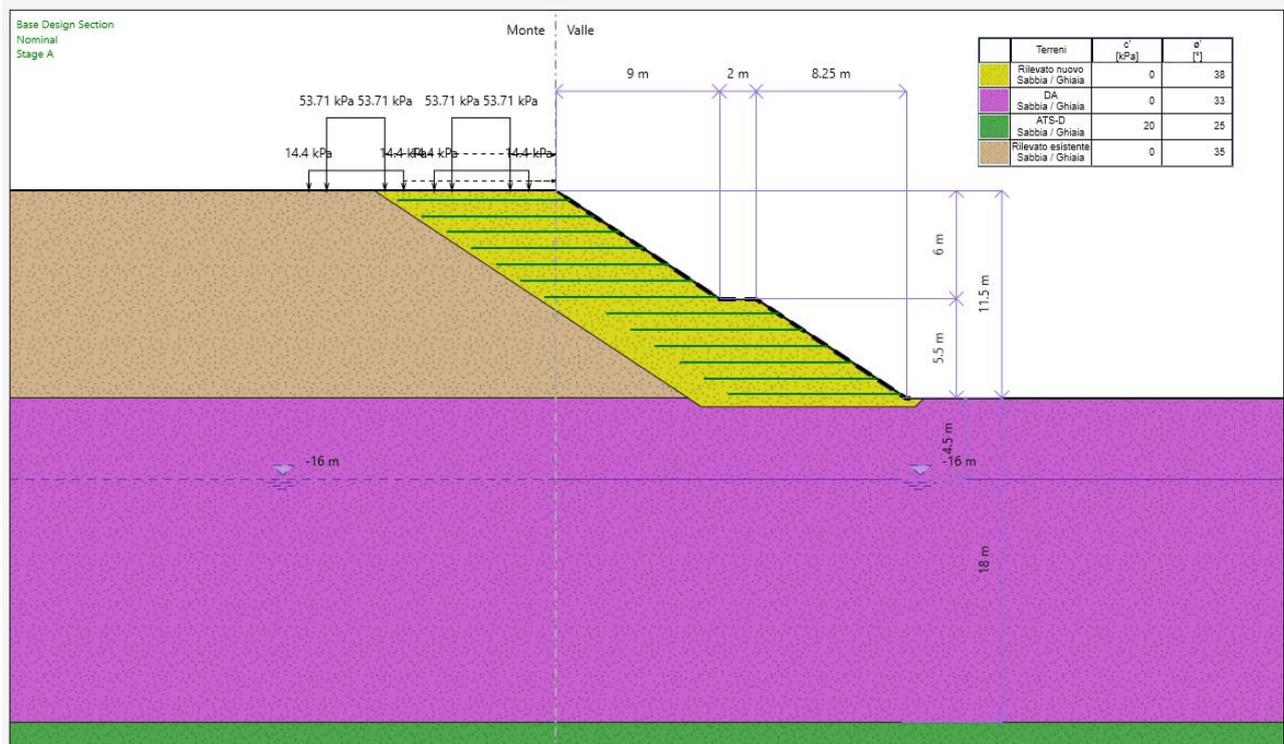


Figura 7.4: modello di calcolo con indicazione dei parametri caratteristici dei materiali.

In Figura 7.5 e Figura 7.7 vengono riportate superfici di scorrimento analizzate, mentre in Figura 7.6 e Figura 7.8 sono riportate le superfici associate ai fattori di sicurezza minimi ottenuti rispettivamente in condizioni statiche e sismiche.

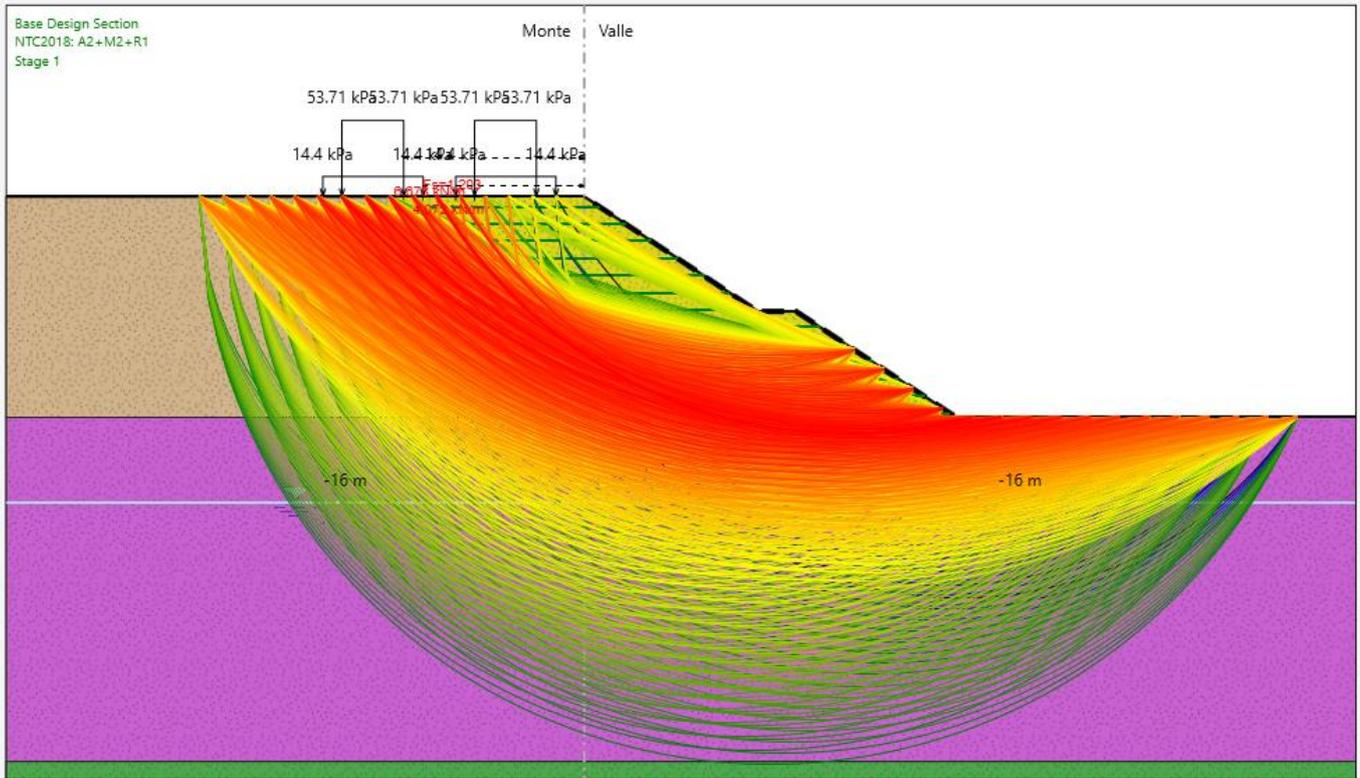


Figura 7.5: analisi di stabilità in condizioni statiche.

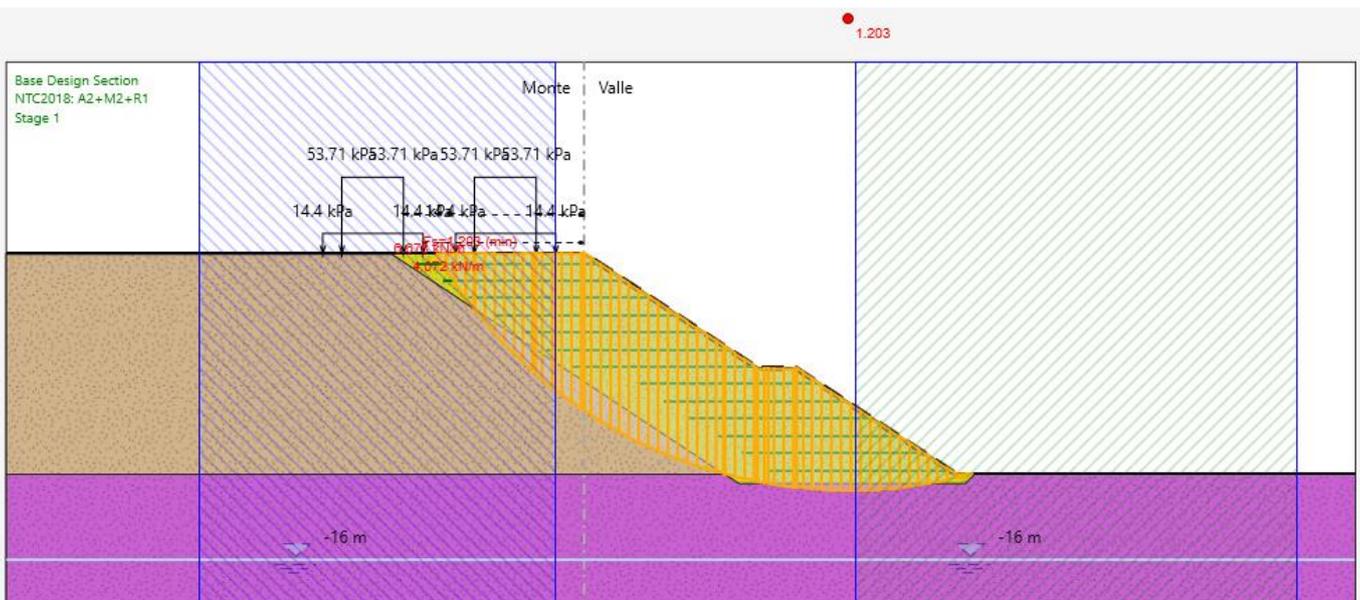


Figura 7.6: superficie critica in condizioni statiche (FS = 1.20).

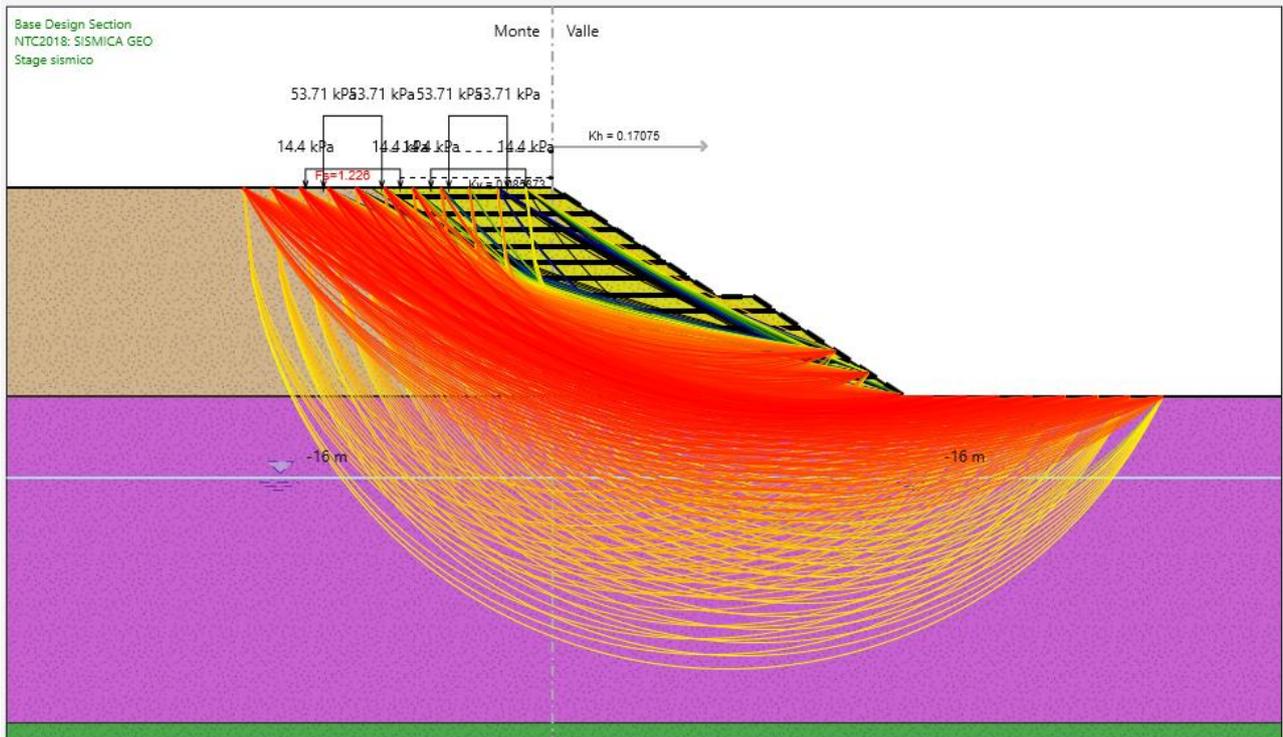


Figura 7.7: analisi di stabilità in condizioni sismiche.

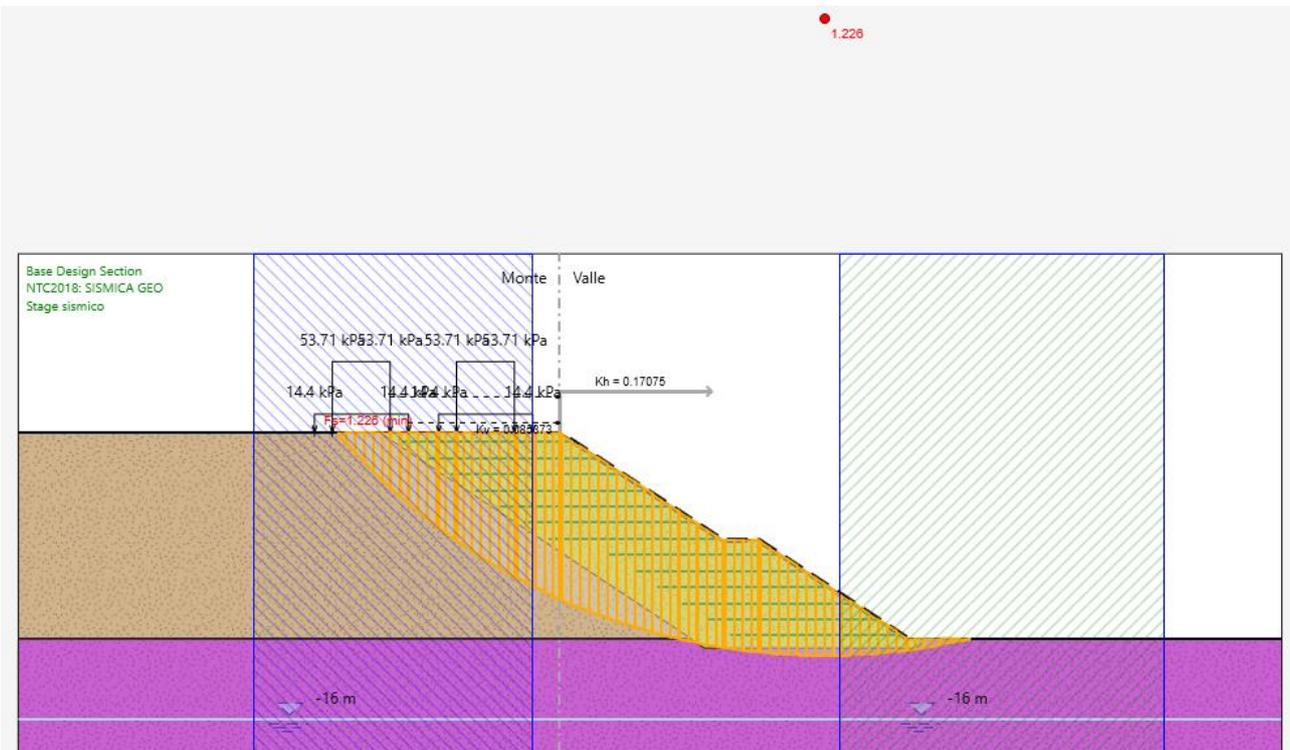


Figura 7.8: superficie critica in condizioni sismiche (FS = 1.23).



LINEA COSENZA – PAOLA S. LUCIDO
NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA
RADDOPPIO COSENZA – PAOLA S. LUCIDO

RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RC1C	03	R 11 RH	GE 00 06 001	A	35 di 71

Il fattore di sicurezza FS minimo tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

- $FS_{MIN} = 1.20$ in condizioni statiche
- $FS_{MIN} = 1.23$ in condizioni sismiche

essendo soddisfatte rispettivamente le relazioni:

- $FS_{MIN} \geq R2 = 1.1$ in condizioni statiche
- $FS_{MIN} \geq R2 = 1.2$ in condizioni sismiche

la verifica di stabilità globale risulta soddisfatta.

Non viene eseguita alcuna analisi non drenata perché le curve di scorrimento critiche non interessano materiali coesivi .

7.4.2 Verifica dei cedimenti – modello FEM

La geometria utilizzata è mostrata nella figura seguente. Con rispetto alle condizioni idrauliche al contorno, si permette il flusso in tutte le direzioni (*seepage*). Come definito in precedenza, si può notare che il nuovo rilevato raggiunge un'altezza di 11.5 m mentre la falda di progetto si trova 4.5 m sotto il piano di campagna.

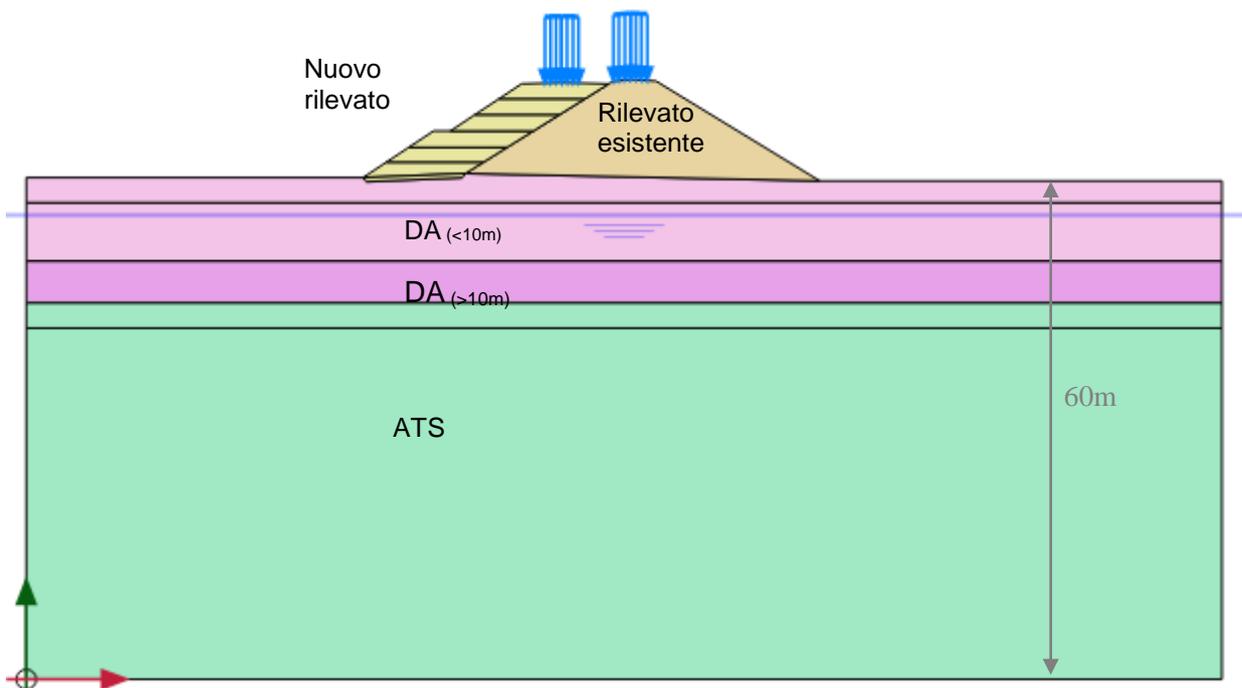


Figura 7.9 Sezione rilevato di analisi in Plaxis

7.4.2.1 Fasi del modello

L'analisi agli elementi finiti effettuata per il modello alla PK 1+000 (BD) che verrà proposta di seguito, è strutturata con le seguenti fasi di calcolo (le fasi da 0 a 3 sono indicative della situazione ante-operam):

0. Fase geostatica di inizializzazione del modello, considerando il rilevato esistente.
1. Fase di consolidazione di 7 giorni del rilevato esistente.
2. Applicazione del carico dovuto al pacchetto di armamento ferroviario sul rilevato esistente.

3. Consolidazione del rilevato esistente dopo 50 anni (tempo indicativo) o fino a un grado del 99.5%.
4. *Reset displacements* + Scotico 50 cm sotto la zona del rilevato.
5. Costruzione del rilevato in affiancamento per strati di circa 1m ogni 10 giorni, quindi 6 step per un totale di 11.5m in 60 giorni.
11. Consolidazione del rilevato in 214 giorni (costruzione rilevato in affiancamento + consolidazione in 9 mesi).
12. *Reset displacements* per azzeramento cedimenti pre-applicazione ballast + Applicazione del carico dovuto al pacchetto di armamento ferroviario del nuovo rilevato in 1 giorno.
13. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 1 settimana.
14. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 2 settimane.
15. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 1 mese.
16. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 2 mesi.
17. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 4 mesi.
18. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 6 mesi.
19. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 1 anno.
20. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 2 anni.
21. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 5 anni.
22. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 10 anni.
23. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 20 anni.

7.4.2.2 Spostamenti verticali

Sono stati analizzati gli spostamenti verticali dopo la costruzione e la consolidazione (durata totale pari a 9 mesi) del nuovo rilevato (fase 11), e successivamente il cedimento post-costruzione, valutato dopo 20 anni di consolidazione a partire dall'applicazione del piano di posa del ballast (fase 23) per valutare il massimo cedimento residuo dovuto alla consolidazione primaria sulla superficie del rilevato.

Nella Figura 7.10 si possono valutare i cedimenti verticali totali a fine costruzione (Fase 11); il cedimento massimo atteso è pari a 5.0 cm, in corrispondenza della nuova scarpata, mentre alla base del ballast di progetto il cedimento sarà leggermente inferiore, dell'ordine dei 4.7 cm. Nella Figura 7.11 invece è rappresentato il cedimento a fine costruzione del nuovo rilevato (fase 11) in corrispondenza della superficie di posa del ballast.

In figura Figura 7.12 e Figura 7.13 invece si possono vedere i cedimenti (totali ed in corrispondenza del coronamento del rilevato) a 20 anni di consolidazione.

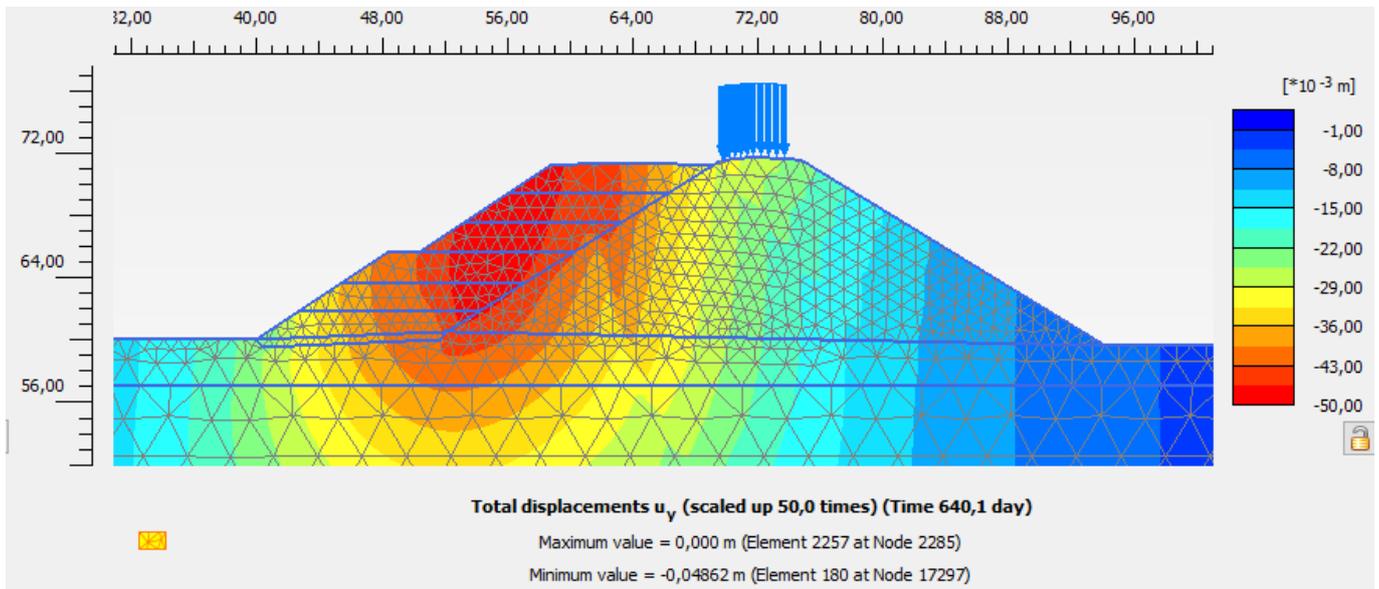


Figura 7.10 Spostamenti verticali al termine della costruzione del rilevato, prima dell'installazione del ballast (fase 11)

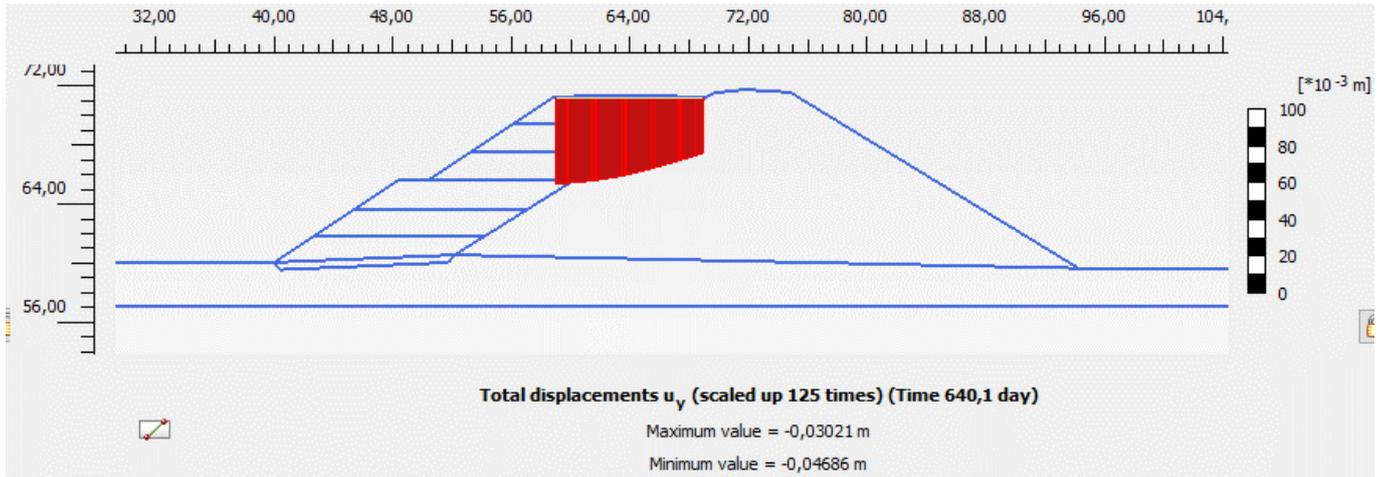


Figura 7.11 Spostamenti verticali in superficie al termine della costruzione del rilevato, prima dell'installazione del ballast (fase 11)

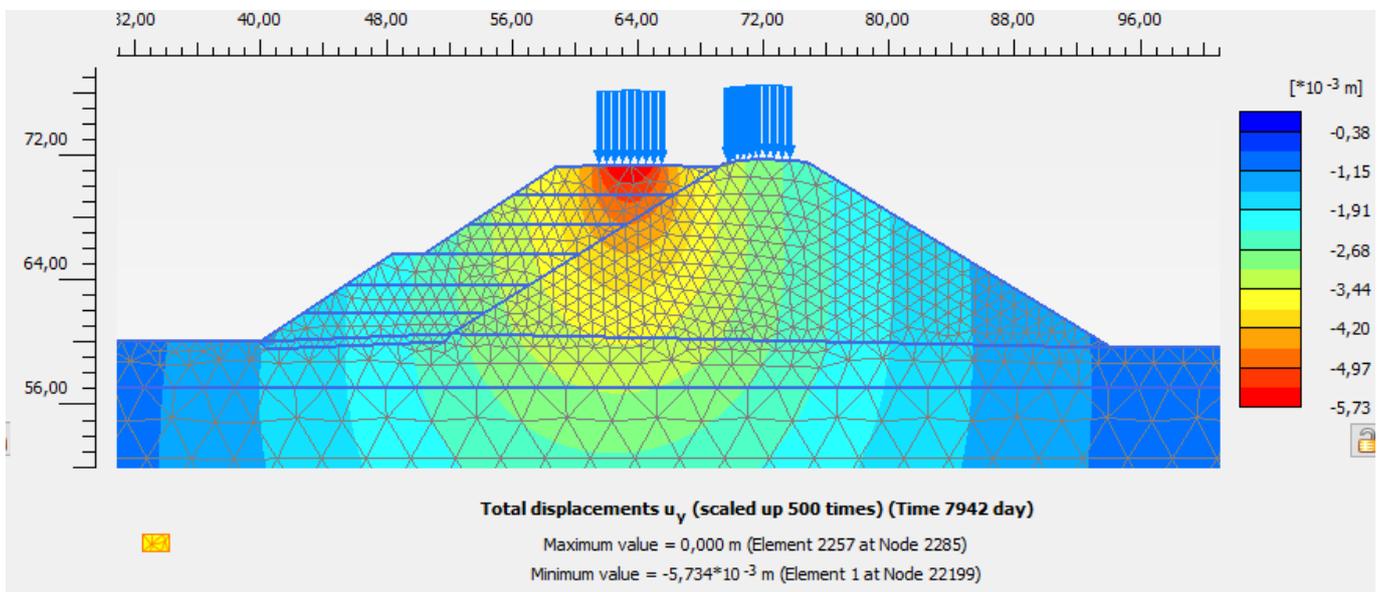


Figura 7.12 Spostamenti verticali residui dopo 20 anni di consolidazione (fase 23)

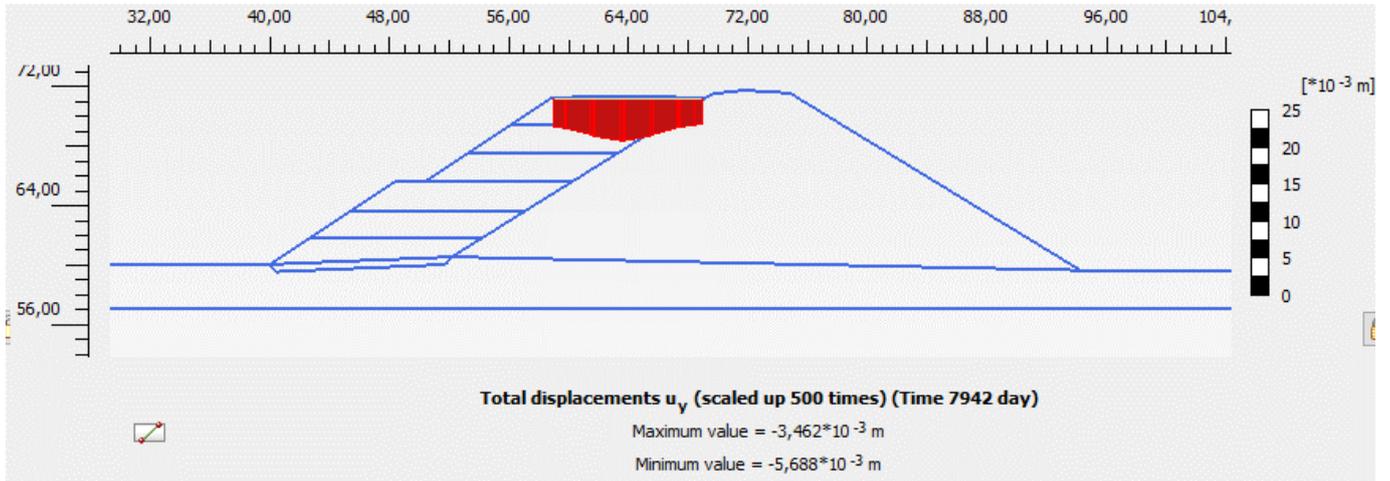


Figura 7.13 Spostamenti verticali residui in superficie dopo 20 anni di consolidazione (fase 23)

Come riscontrabile in Figura 7.13, il cedimento residuo dovuto alla consolidazione primaria è 0.57 cm in corrispondenza del piano di posa del ballast.

7.4.2.3 Curva cedimenti-tempo

La curva cedimenti-tempo viene estratta in corrispondenza del punto con maggior spostamento verticale del rilevato lungo il piano di posa del ballast. La valutazione dei cedimenti è calcolata a partire dalla fase 11, ovvero la fine della costruzione del nuovo rilevato in affiancamento. Tale grafico presenta sull'asse delle ascisse il tempo, espresso in anni, mentre sull'asse delle ordinate viene indicato il cedimento, espresso in mm.

Il cedimento residuo dovuto alla consolidazione primaria a 20 anni (lungo il piano di posa del ballast) risulta, quindi, $5.73 \text{ mm} = 0.57 \text{ cm}$

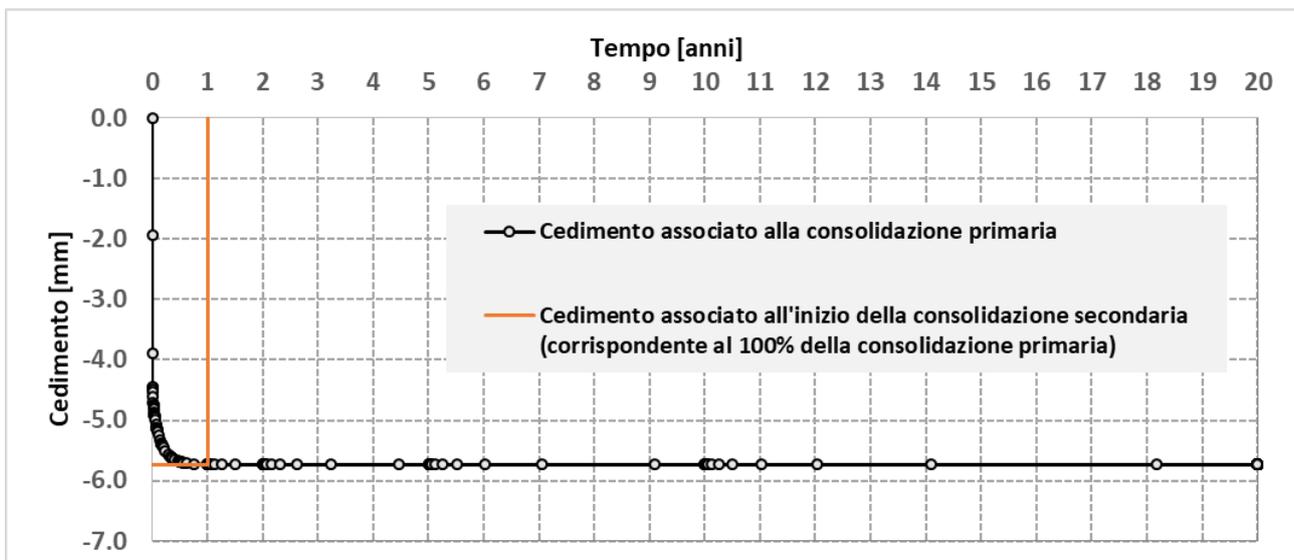


Figura 7.14 Curva cedimenti-tempo Plaxis

Dal grafico è anche possibile ottenere il valore di cedimento e di tempo corrispondenti all'inizio della consolidazione secondaria. In questa fase si è deciso di considerare l'inizio di tale consolidazione nel momento in cui si esaurisce completamente la consolidazione primaria.

Di seguito vengono riepilogati i valori di cedimento primario e il tempo necessario al suo raggiungimento:

- Cedimento corrispondente al 100% della consolidazione primaria: $5.73 \text{ mm} = 0.57 \text{ cm}$
- Tempo corrispondente al 100% della consolidazione primaria (t_{100}) = 12.12 mesi = 1.01 anni



LINEA COSENZA – PAOLA S. LUCIDO
NUOVA LINEA AV SALERNO – REGGIO CALABRIA
RADDOPPIO COSENZA – PAOLA S. LUCIDO

RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI FERROVIARI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RC1C	03	R 11 RH	GE 00 06 001	A	42 di 71

7.4.2.4 Cedimento residuo totale

Nella sezione analizzata, trovandosi lo strato argilloso a profondità maggiori rispetto a quella del volume rappresentativo considerato (pari alla larghezza dell'impronta del nuovo rilevato, i.e. 12 m), si è omesso il calcolo dei cedimenti legati alla consolidazione secondaria.

Il cedimento residuo totale è di 0.57 cm quindi inferiore al limite di 5.0 cm, pertanto il vincolo sul cedimento residuo è soddisfatto.

7.4.2.5 Cedimenti differenziali del binario esistente

Sono stati analizzati i cedimenti differenziali tra le rotaie del binario esistente nelle diverse fasi modellizzate. La tabella seguente mostra gli spostamenti verticali sotto ciascun binario ed il corrispondente spostamento differenziale corrispondente.

Tabella 7.4: Cedimenti verticali sotto il binario esistente.

Fase	Descrizione	Cedimento verticale sotto binario sx. (mm)	Cedimento verticale sotto binario dx. (mm)	Cedimento differenziale (mm)
Fase 4	Scotico 50 cm	-0.64	-0.66	0.03
Fase 5	Costr. 1 ril. (10 giorni)	-2.64	-2.48	0.16
Fase 6	Costr. 2 ril. (10 giorni)	-4.32	-4.12	0.20
Fase 7	Costr. 3 ril. (10 giorni)	-6.70	-6.35	0.34
Fase 8	Costr. 4 ril. (10 giorni)	-9.32	-8.75	0.57
Fase 9	Costr. 5 ril. (10 giorni)	-12.61	-11.74	0.87
Fase 10	Costr. 6 ril. (10 giorni)	-16.94	-15.55	1.39
Fase 11	Consolidamento (214 giorni) (Fine costruzione rilevato, 9 mesi)	-28.79	-27.20	1.59
Fase 12	Arm. Ferroviario (1 giorno)	-30.56	-28.75	1.81
Fase 13	Consolidazione (1 settimana)	-30.85	-29.03	1.82
Fase 14	Consolidazione (2 settimane)	-31.00	-29.18	1.82
Fase 15	Consolidazione (1 mese)	-31.22	-29.40	1.82
Fase 16	Consolidazione (2 mesi)	-31.47	-29.65	1.82
Fase 17	Consolidazione (4 mesi)	-31.69	-29.87	1.82
Fase 18	Consolidazione (6 mesi)	-31.77	-29.95	1.82
Fase 19	Consolidazione (1 anno)	-31.81	-29.99	1.82
Fase 20	Consolidazione (2 anni)	-31.81	-29.99	1.82
Fase 21	Consolidazione (5 anni)	-31.81	-29.99	1.82
Fase 22	Consolidazione (10 anni)	-31.81	-29.99	1.82
Fase 23	Consolidazione (20 anni)	-31.81	-29.99	1.82

Nelle fasi 19-23 (le più critiche), lo spostamento verticale sotto il binario sx è di 31.8 mm, mentre sotto il binario dx è di 30.0 mm. Lo spostamento differenziale verticale tra i binari è di 1.8 mm, pertanto inferiore al limite massimo di 10 mm.

Nella figura seguente il cedimento differenziale in corrispondenza della linea esistente.

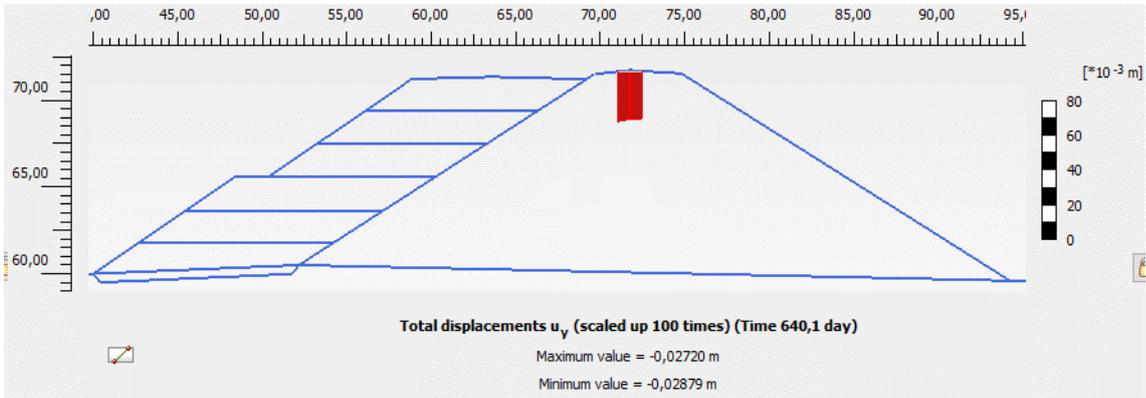


Figura 7.15: cedimento differenziale rotaie rilevato esistente a fine costruzione del nuovo rilevato (Fase11)

7.5 ANALISI RILEVATO N.2 - IN AFFIANCAMENTO LATO PAOLA – P48BP

Il rilevato presenta un'altezza massima pari a circa 5.2 m ed è realizzato con scarpate di pendenza 3H:2V; la sezione di riferimento è indicativamente la progressiva 20+655 (P48). Tale rilevato poggia sul rilevato esistente (quest'ultimo attualmente con linea ferroviaria a singolo binario) come da sezione riportata nella figura successiva. Questo rilevato è stato analizzato come rappresentativo (in termini di massima altezza) della sezione di rilevato in affiancamento alla linea ferroviaria esistente lato Paola, al fine di valutare gli effetti del nuovo rilevato su quello esistente.

Ai fini di una valutazione cautelativa dei cedimenti, nella sezione analizzata la distanza dalla linea esistente è posta a 7.8 m dall'asse della nuova linea in progetto, questo perchè tale distanza è la minima riscontrabile nel tratto di affiancamento. Tale sezione, non essendo effettivamente presente tra le sezioni realmente esistenti, è stata però considerata rappresentativa del calcolo, in quanto cautelativa rispetto alle effettive condizioni presenti. Il rilevato è previsto con trattamento a calce, utilizzando i materiali di risulta proveniente dallo scavo della galleria naturale.

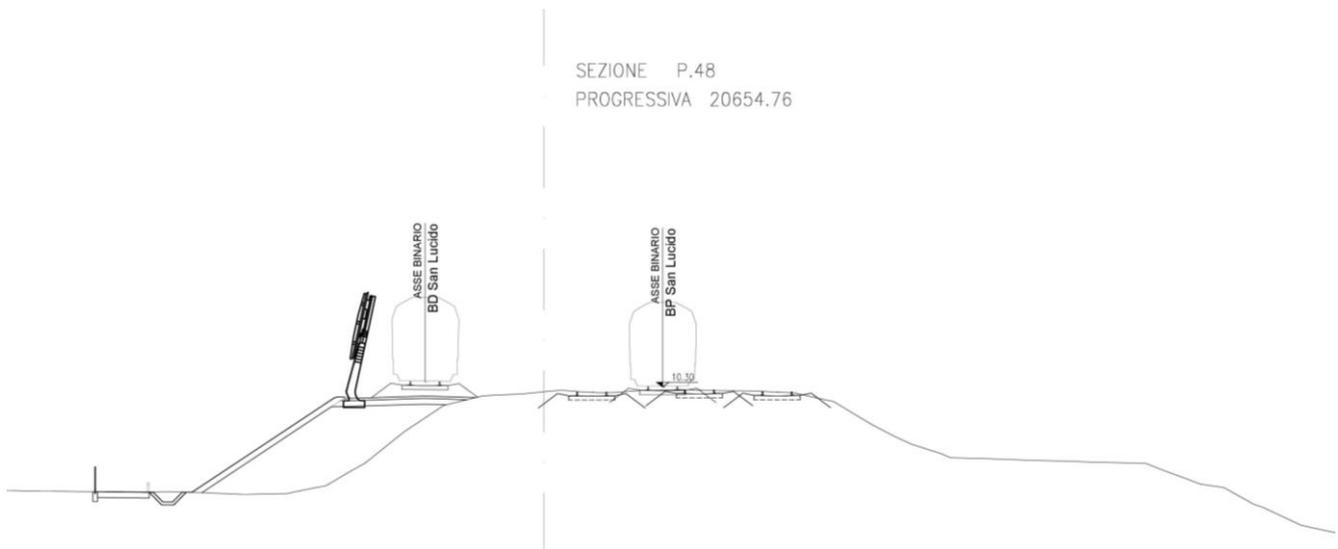


Figura 7.16 Sezione rilevato in affiancamento lato Paola

Il modello geotecnico è rappresentato dalla successione stratigrafica caratterizzata dai parametri meccanici sintetizzati nella seguente tabella. La falda è posizionata a 3.8 m dal piano di campagna.

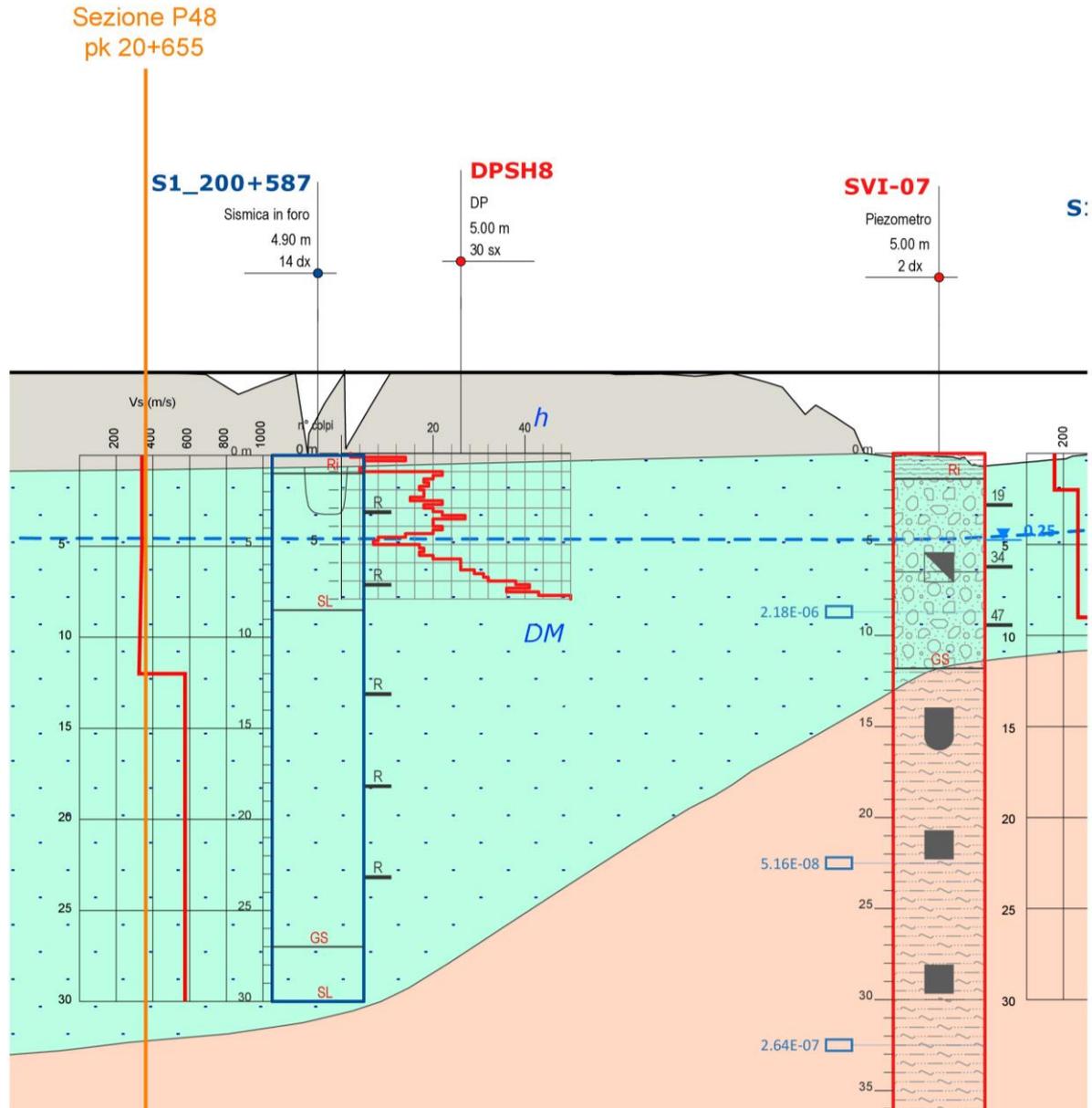


Figura 7.17 – profilo geotecnico in corrispondenza della sezione tipo “rilevato in affiancamento”.

Le caratteristiche dei materiali da costruzione dei rilevati assunte in progetto sono conformi a quanto previsto nel Manuale di Progettazione RFI e nel Capitolato di Costruzione RFI (Doc. Rif [3][4]). Secondo il profilo geotecnico, in questa sezione sono stati considerati i seguenti materiali:

U.G.	Legame	Prof. strato	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ' (°)	k (m/s)	E' (MPa)	ν (-)	C_c	C_s	e_{init}	OCR
Rilevato esistente	MC	-	20.0	0	35	5.8 E-5	30	0.30	-	-	-	-
Rilevato nuovo trattato a calce	MC	-	17	50	30	5.8 E-5	30	0.30	-	-	-	-
DM < 10m	MC	0-10m	20.0	0	35	2.0 E-6	30	0.30	-	-	-	-
DM > 10m	MC	10 -30m	20.0	0	35	2.0 E-6	45	0.30	-	-	-	-
ALD	SS	>30m	20.5	25	24	5.0 E-8	-	0.30	0.158	0.052	0.5	1.5

Tabella 7.5: parametri geotecnici caratteristici.

Con riferimento alla tabella anteriore, i parametri C_c e C_s del materiale ALD si riferiscono rispettivamente all'indice di compressibilità ed all'indice di scarico.

Come definito nella relazione Geotecnica (doc.Rif. [9]), al materiale DM, per i 10 primi metri di profondità, è stato assegnato un valore di modulo elastico E' pari a 30 MPa; a profondità maggiori invece si è considerato un E' di 45 MPa.

7.5.1 Analisi di stabilità in condizioni statiche e sismiche

In Figura 7.18 è riportata un'immagine del modello di calcolo.

Si fa notare che nonostante i parametri ed i carichi riportati nelle figure corrispondono a quelli con coefficiente unitario, il programma Paratie Plus applica direttamente (i.e. internamente al programma) i coefficienti secondo il codice NTC2018, come spiegato nel capitolo 5.

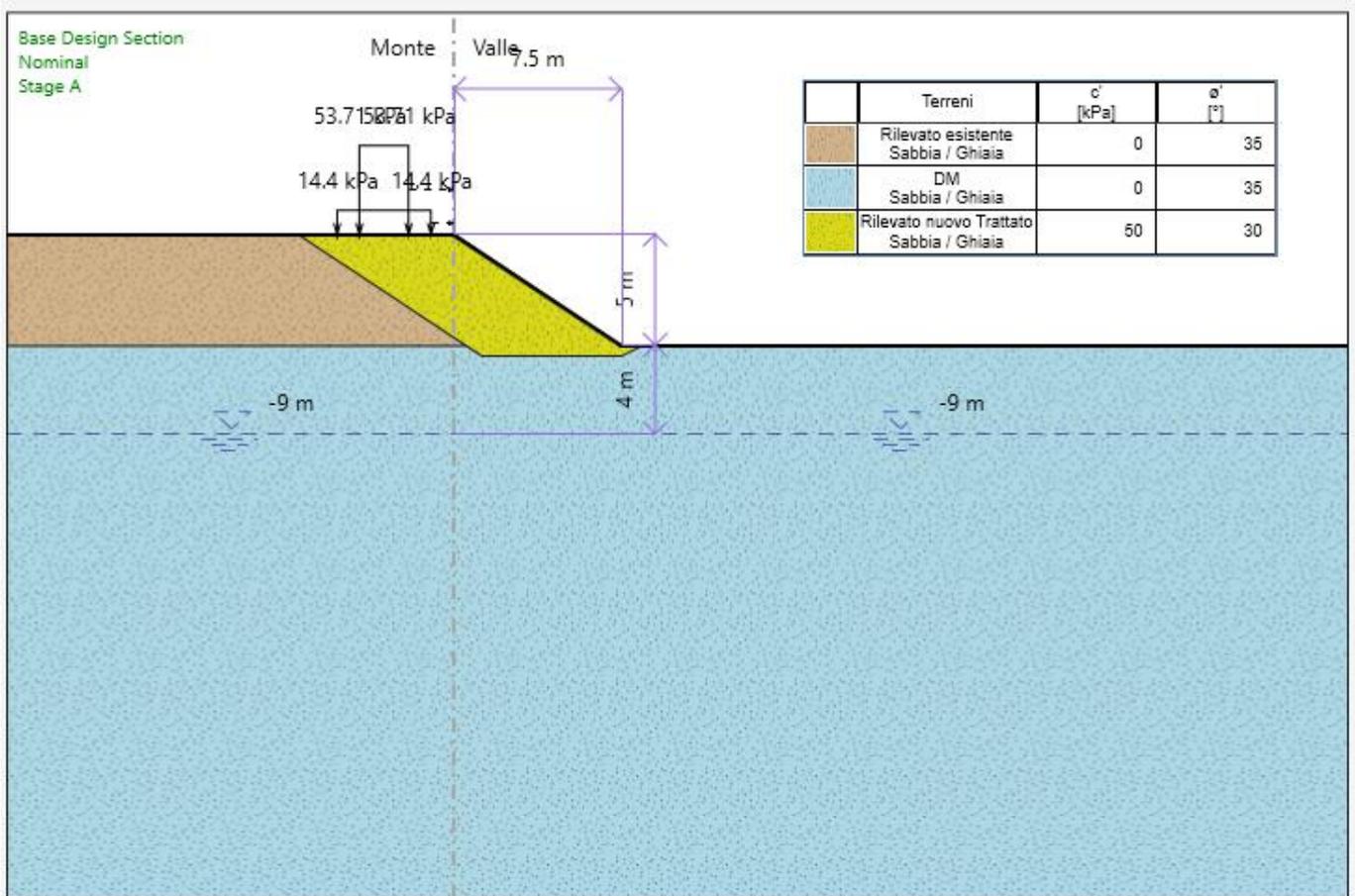


Figura 7.18: modello di calcolo con indicazione dei parametri caratteristici dei materiali.

In Figura 7.19 e Figura 7.21 vengono riportate superfici di scorrimento analizzate, mentre in Figura 7.20 e Figura 7.22 sono riportate le superfici associate ai fattori di sicurezza minimi ottenuti in condizioni statiche e sismiche.

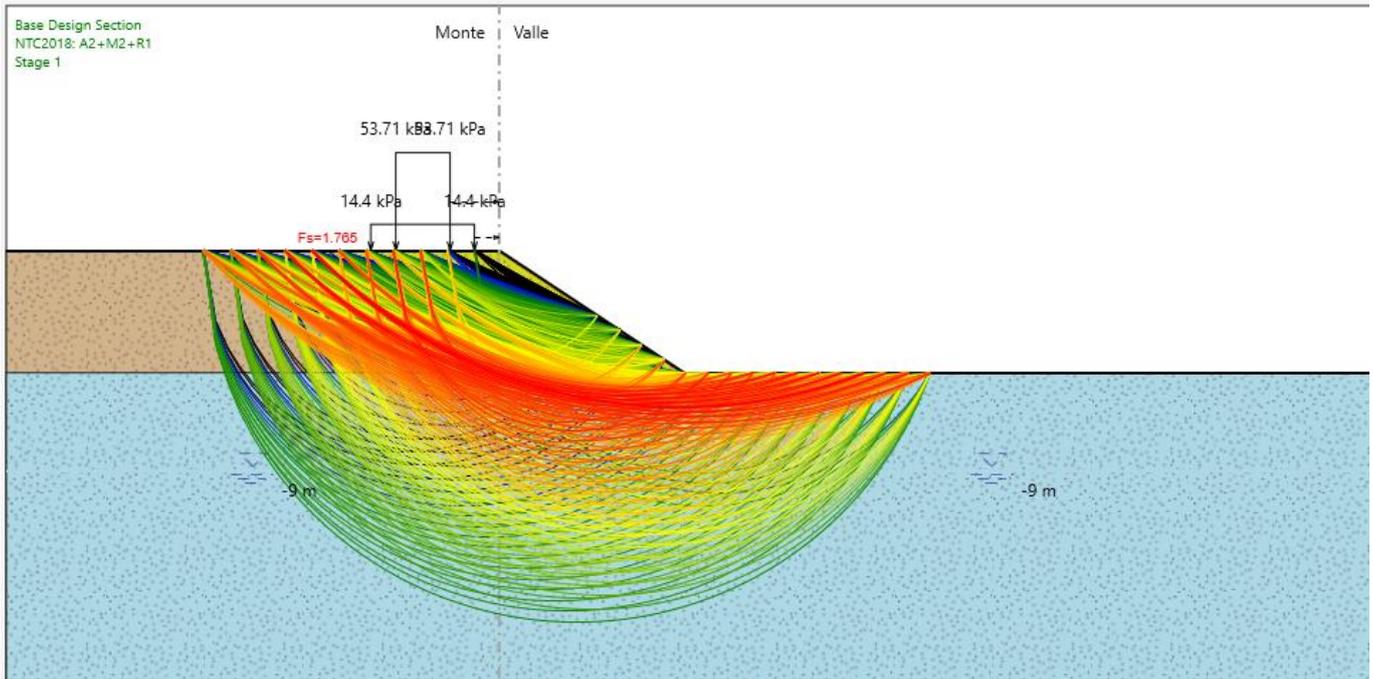


Figura 7.19: analisi di stabilità in condizioni statiche.

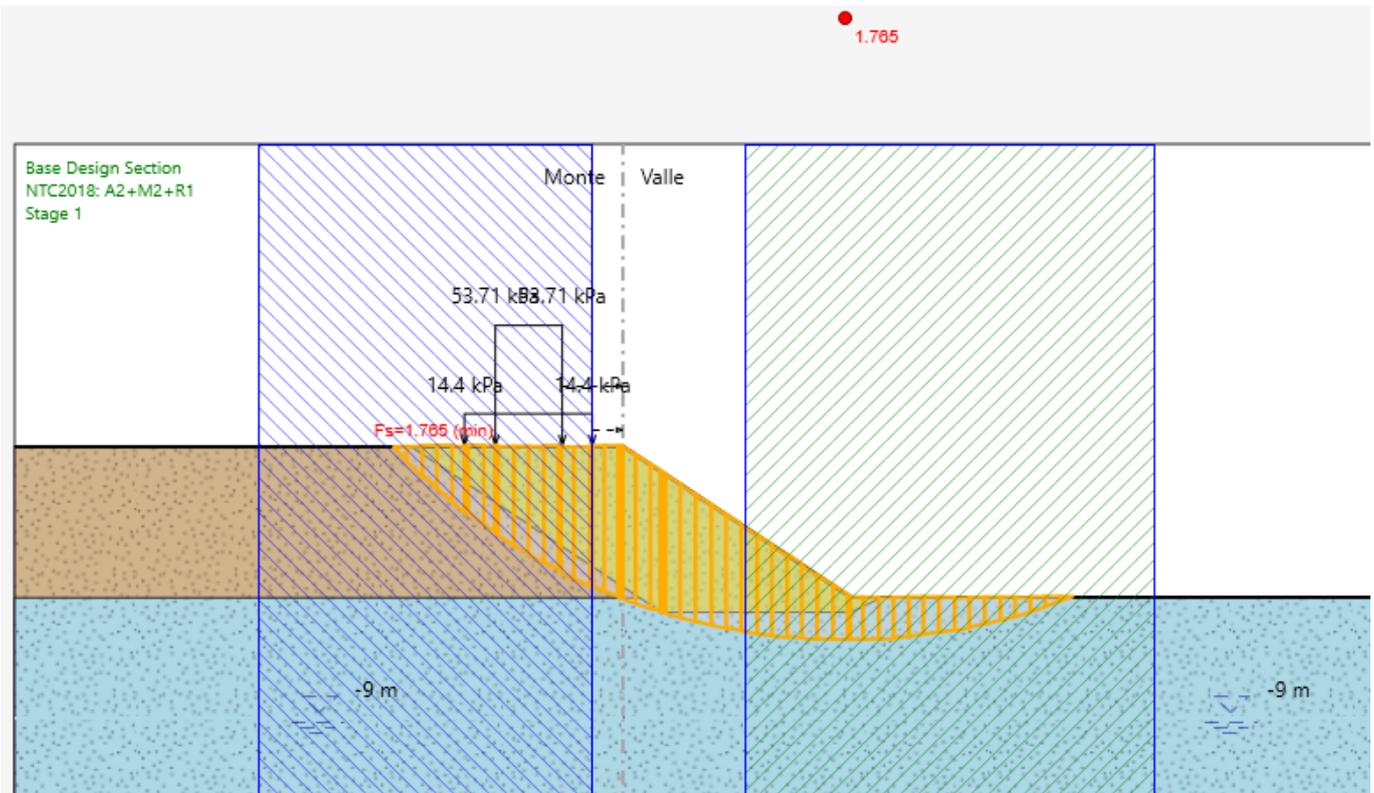


Figura 7.20: superficie critica in condizioni statiche ($F_s = 1.77$).

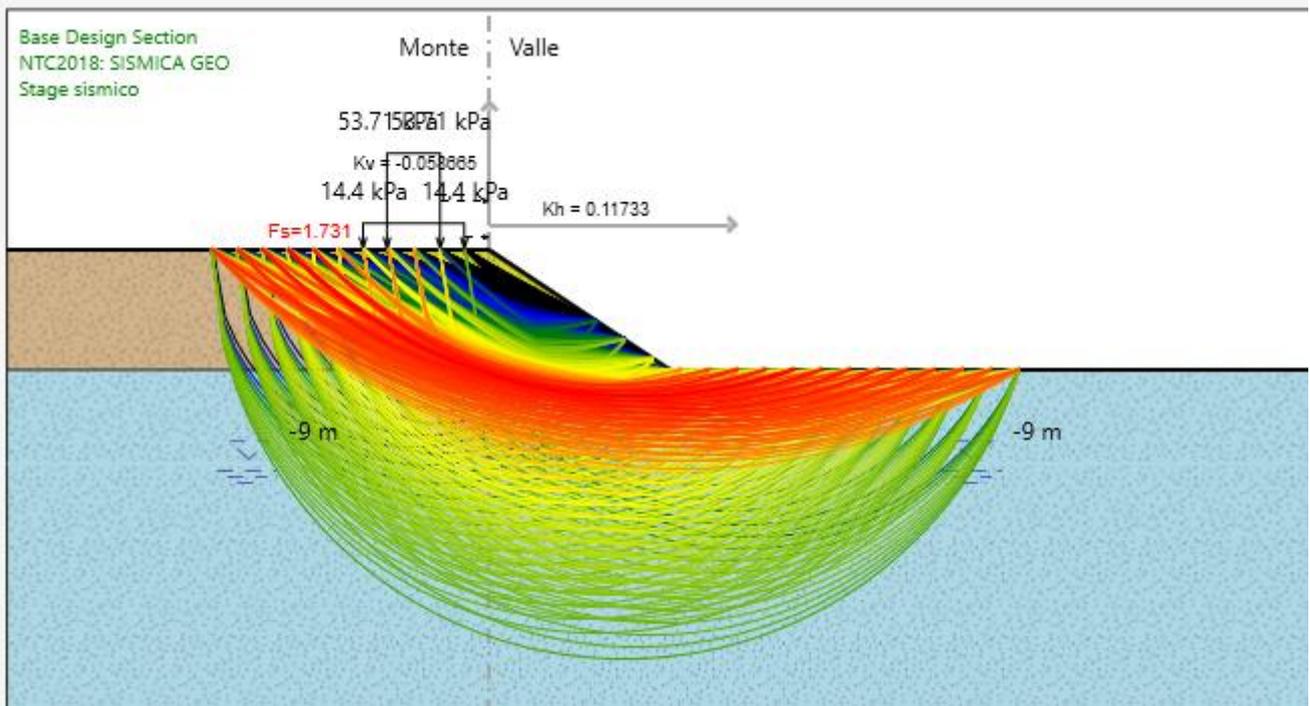


Figura 7.21: analisi di stabilità in condizioni sismiche.

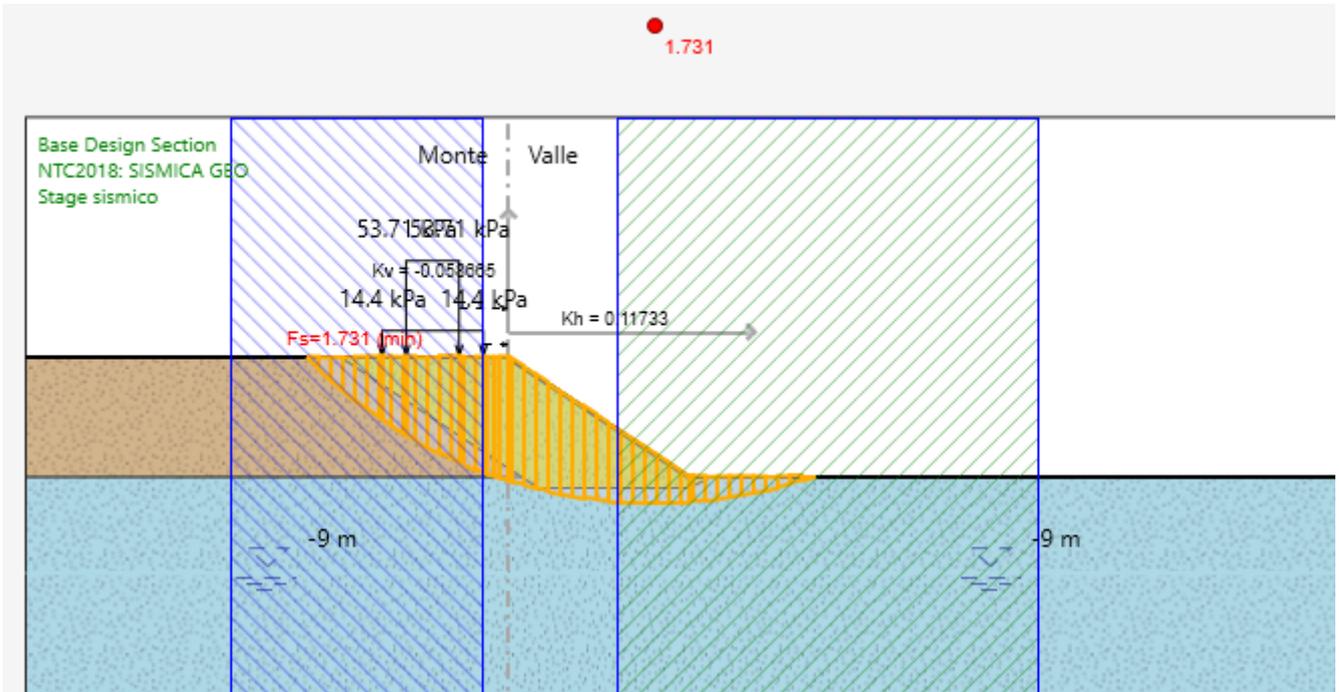


Figura 7.22: superficie critica in condizioni sismiche (FS = 1.73).

Il fattore di sicurezza FS minimo tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

- $FS_{MIN} = 1.77$ in condizioni statiche
- $FS_{MIN} = 1.73$ in condizioni sismiche

essendo soddisfatte rispettivamente le relazioni:

- $FS_{MIN} \geq R2 = 1.1$ in condizioni statiche
- $FS_{MIN} \geq R2 = 1.2$ in condizioni sismiche

la verifica di stabilità globale risulta soddisfatta.

7.5.2 Verifica dei cedimenti – modello FEM

La geometria utilizzata è mostrata nella figura seguente. Con rispetto alle condizioni idrauliche al contorno, si permette il flusso in tutte le direzioni (*seepage*). Si può notare che il nuovo rilevato trattato con calce raggiunge un'altezza di circa 5 m. La falda di progetto si trova 4 m sotto il piano di campagna secondo il profilo geotecnico.

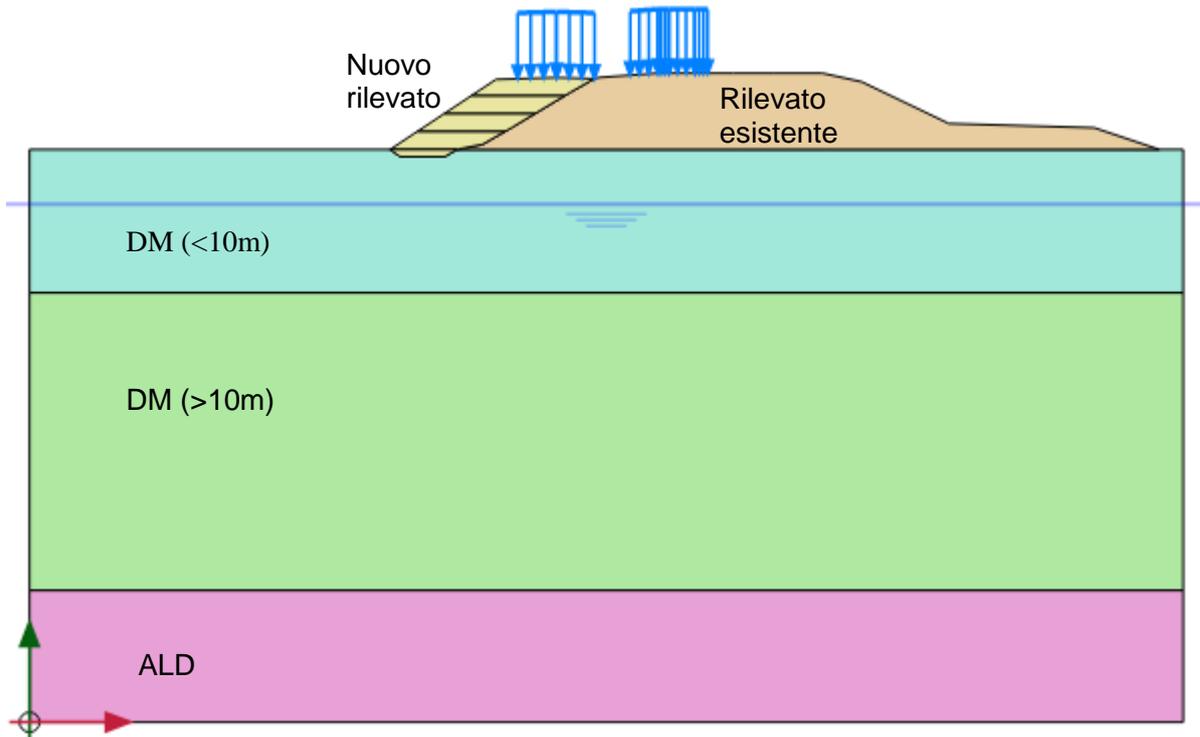


Figura 7.23 Sezione in rilevato in Plaxis

Fasi del modello

L'analisi agli elementi finiti effettuata per il modello della sezione tipo P48 che verrà proposta di seguito, è strutturata con le seguenti fasi di calcolo (le fasi da 0 a 3 sono indicative della situazione ante-operam)::

0. Fase geostatica di inizializzazione del modello.
1. Fase di costruzione del rilevato esistente.
2. Applicazione del carico dovuto al pacchetto di armamento ferroviario rilevato esistente.
3. Consolidazione del rilevato esistente dopo 50 anni (tempo indicativo) o fino a un grado del 99.5%.
4. *Reset displacements* + Scotico 50 cm sotto la zona del rilevato.
5. Costruzione del rilevato in affiancamento per strati di circa 1m ogni 10 giorni, quindi 4 step per un totale di 5 m in 40 giorni.
9. Consolidazione del rilevato in 234 giorni (costruzione rilevato in affiancamento + consolidazione in 9 mesi).
10. *Reset displacements* per azzeramento cedimenti pre-applicazione ballast + Applicazione del carico dovuto al pacchetto di armamento ferroviario del nuovo rilevato in 1 giorno.
11. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 1 settimana.
12. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 2 settimane.
13. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 1 mese.
14. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 2 mesi.
15. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 4 mesi.
16. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 6 mesi.
17. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 1 anno.
18. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 2 anni.
19. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 5 anni.

20. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 10 anni.
21. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 20 anni.

7.5.2.1 Spostamenti verticali

Sono stati analizzati gli spostamenti verticali dopo la costruzione e la consolidazione (durata totale pari a 9 mesi) del nuovo rilevato (fase 9) e dopo 20 anni di consolidazione (fase 21) per trovare il massimo cedimento residuo dovuto alla consolidazione primaria sulla superficie del rilevato.

Nella Figura 7.24 si possono valutare i cedimenti verticali totali a fine costruzione (Fase 9), il cedimento massimo atteso è pari a 2.9 cm, in corrispondenza della nuova scarpata, mentre sul piano di posa del ballast il cedimento sarà di poco inferiore, circa 2.8 cm. Nella Figura 7.25 è rappresentato il cedimento a fine costruzione del nuovo rilevato (fase 9) in corrispondenza della superficie di posa del ballast.

In figura Figura 7.26 e Figura 7.27 invece si possono vedere i cedimenti (totali ed in corrispondenza del coronamento del rilevato) a 20 anni di consolidazione.

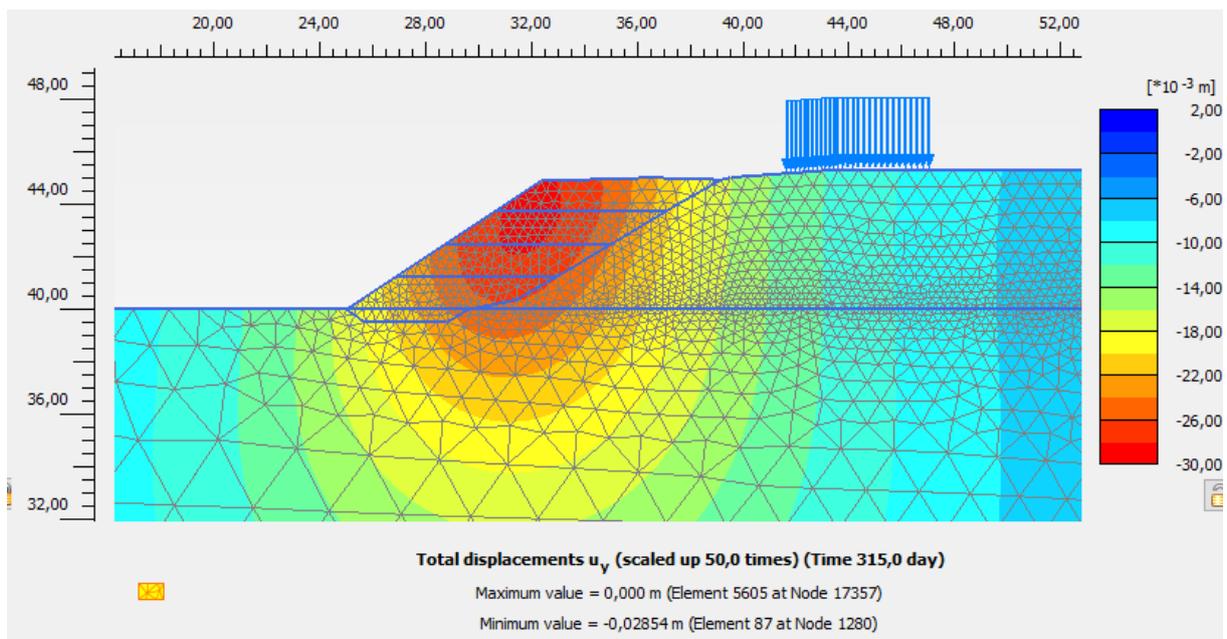


Figura 7.24 Spostamenti verticali al termine della costruzione del rilevato, prima dell'installazione del ballast (fase 9)

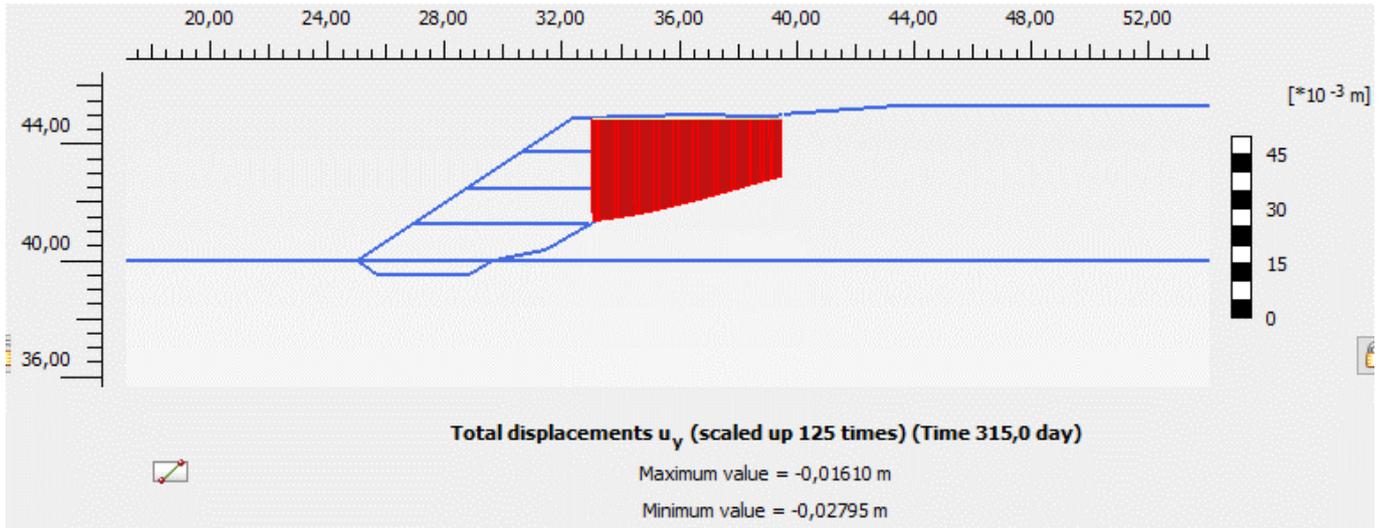


Figura 7.25 Spostamenti verticali in superficie al termine della costruzione del rilevato, prima dell'installazione del ballast (fase 9)

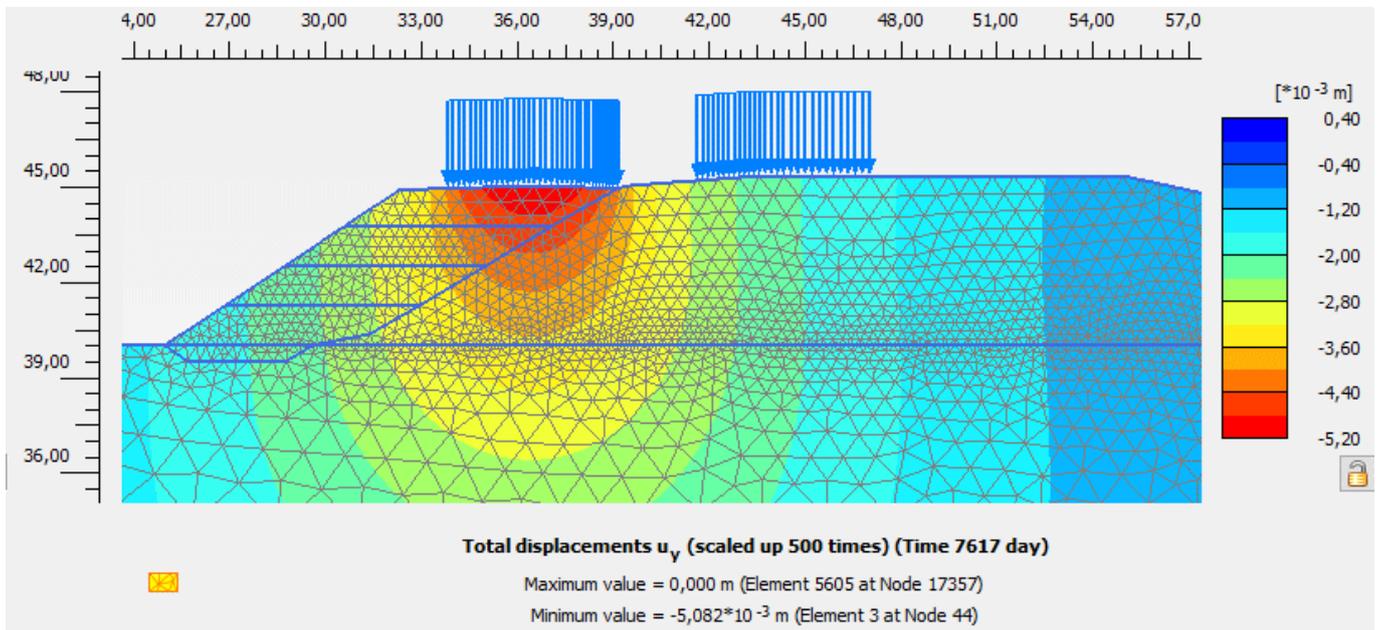


Figura 7.26 Spostamenti residui verticali dopo 20 anni di consolidazione (fase 21)

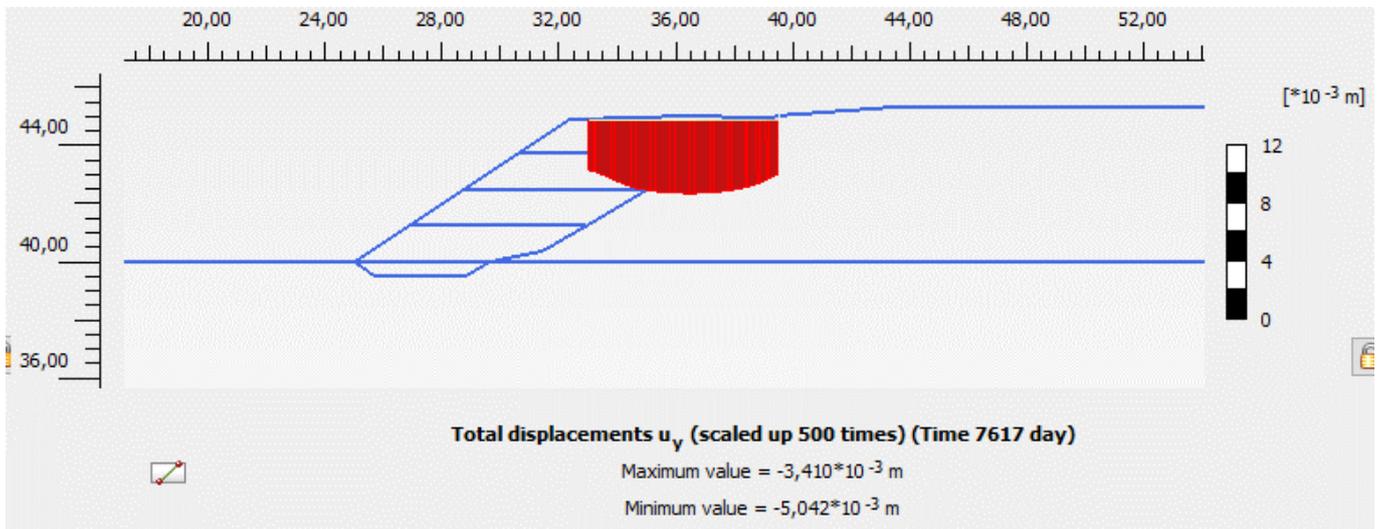


Figura 7.27 Spostamenti residui verticali in superficie dopo 20 anni di consolidazione (fase 21)

Come riscontrabile in Figura 7.27 il cedimento residuo dovuto alla consolidazione primaria è 0.5 cm in corrispondenza del piano di posa del ballast.

7.5.2.2 Curva cedimenti-tempo

La curva cedimenti-tempo viene estratta in corrispondenza del punto con maggior spostamento verticale del rilevato lungo il piano del ballast. La valutazione dei cedimenti è calcolata a partire dalla fase 10, ovvero la fine della costruzione del nuovo rilevato in affiancamento. Tale grafico presenta sull'asse delle ascisse il tempo, espresso in anni, mentre sull'asse delle ordinate viene indicato il cedimento, espresso in mm.

- Il cedimento residuo dovuto alla consolidazione primaria a 20 anni (lungo il piano di posa del ballast) risulta, quindi, 5.08 mm = 0.51 cm

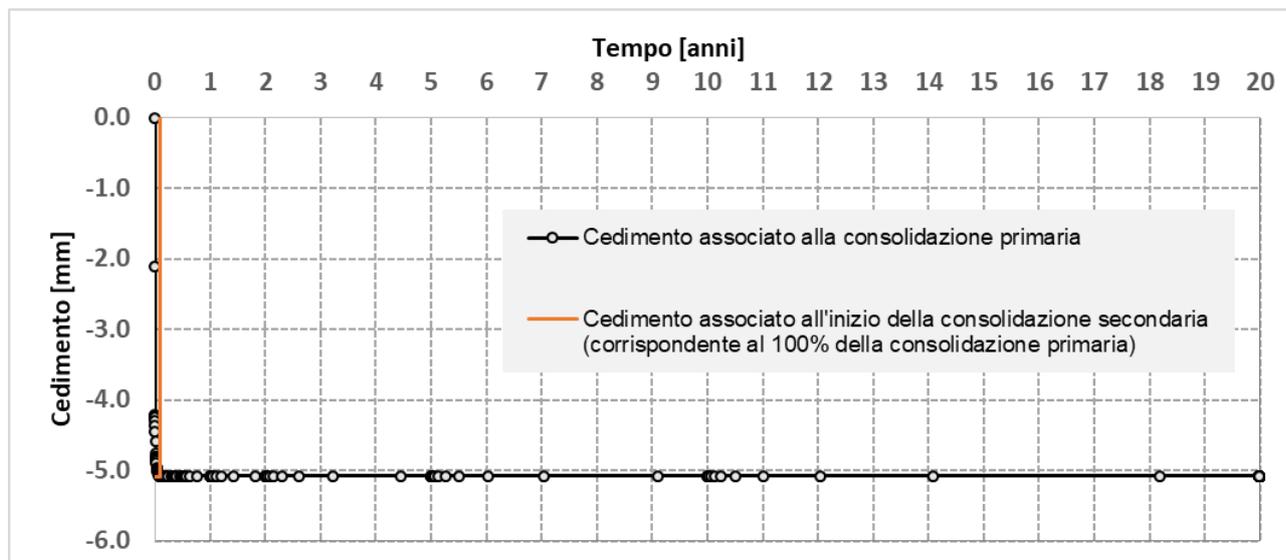


Figura 7.28 Curva cedimenti-tempo Plaxis

Dal grafico è anche possibile ottenere il valore di cedimento e di tempo corrispondenti all'inizio della consolidazione secondaria. In questa fase si è deciso di considerare l'inizio di tale consolidazione nel momento in cui si esaurisce completamente la consolidazione primaria.

Di seguito vengono riepilogati i valori di cedimento primario e il tempo necessario al suo raggiungimento:

- Cedimento corrispondente al 100% della consolidazione primaria: 5.08 mm = 0.51 cm
- Tempo corrispondente al 100% della consolidazione primaria (t_{100}) = 1.07 mesi = 0.09 anni

7.5.2.3 Cedimento residuo totale

La sezione analizzata si trova poggiata su un profondo strato di materiale incoerente DA, di circa 30m. In queste condizioni, la profondità di influenza del nuovo rilevato non raggiunge gli strati argillosi responsabili della consolidazione secondaria, viene quindi omesso il calcolo di tali cedimenti.

Il cedimento residuo totale è quindi pari al cedimento residuo dovuto alla consolidazione primaria (≈ 0.5 cm) quindi inferiore al limite di 5.0 cm, la verifica risulta pertanto soddisfatta.

7.5.2.4 Cedimenti differenziali del binario esistente

Sono stati analizzati i cedimenti differenziali tra le rotaie del binario esistente nelle diverse fasi modellizzate. La tabella seguente mostra gli spostamenti verticali sotto ciascun binario ed il corrispondente spostamento differenziale.

Tabella 7.6: Cedimenti verticali sotto il binario esistente.

Fase	Descrizione	Cedimento verticale sotto binario sx. (mm)	Cedimento verticale sotto binario dx. (mm)	Cedimento differenziale (mm)
Fase 4	Scotico 50 cm	0.21	0.18	0.04
Fase 5	Costr. 1 ril. (10 giorni)	-0.83	-0.69	0.14
Fase 6	Costr. 2 ril. (10 giorni)	-2.07	-1.72	0.35
Fase 7	Costr. 3 ril. (10 giorni)	-3.75	-3.11	0.64
Fase 8	Costr. 4 ril. (10 giorni)	-5.99	-4.96	1.03
Fase 9	Consolidamento (234 giorni) (Fine costruzione rilevato, 9 mesi)	-12.22	-11.10	1.12
Fase 10	Arm. Ferroviario (1 giorno)	-13.78	-12.38	1.40
Fase 11	Consolidazione (1 settimana)	-14.35	-12.95	1.40
Fase 12	Consolidazione (2 settimane)	-14.52	-13.11	1.41
Fase 13	Consolidazione (1 mese)	-14.61	-13.21	1.41
Fase 14	Consolidazione (2 mesi)	-14.62	-13.22	1.41
Fase 15	Consolidazione (4 mesi)	-14.62	-13.22	1.41
Fase 16	Consolidazione (6 mesi)	-14.62	-13.22	1.41
Fase 17	Consolidazione (1 anno)	-14.62	-13.22	1.41
Fase 18	Consolidazione (2 anni)	-14.62	-13.22	1.41
Fase 19	Consolidazione (5 anni)	-14.62	-13.22	1.41
Fase 20	Consolidazione (10 anni)	-14.62	-13.22	1.41
Fase 21	Consolidazione (20 anni)	-14.62	-13.22	1.41

Nelle fasi 14-21 (le più critiche), lo spostamento verticale sotto il binario sx è di 14.62 mm, mentre sotto il binario dx è di 13.22 mm. Quindi lo spostamento differenziale verticale tra i binari è di 1.41 mm, pertanto inferiore al limite massimo di 10 mm.

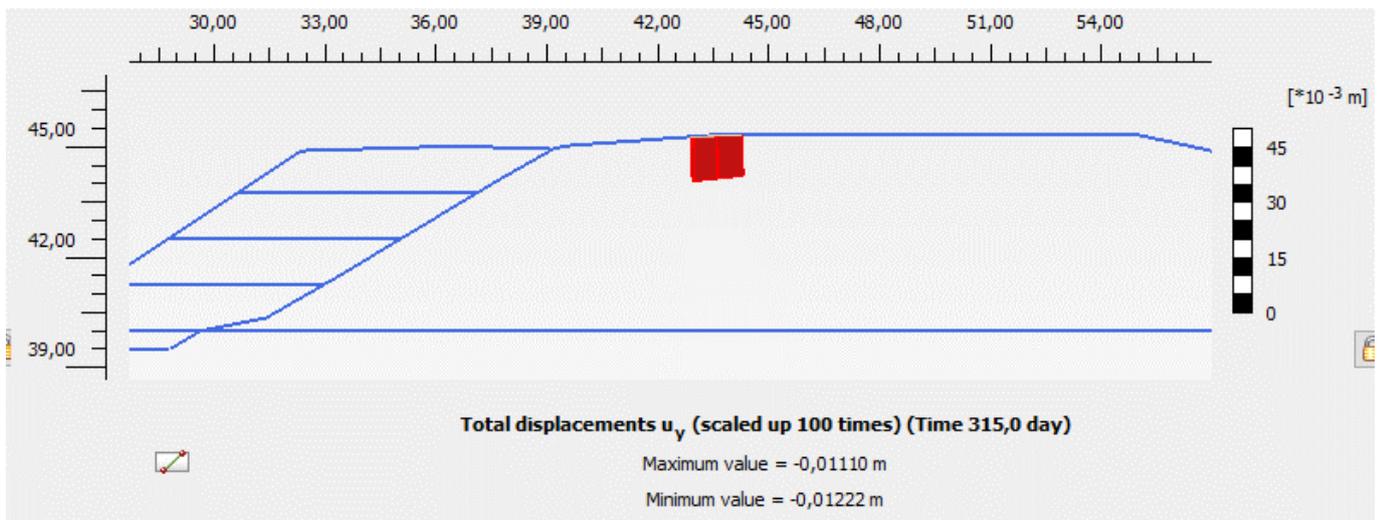


Figura 7.29 Spostamenti verticali del binario esistente (al termine dei 9 mesi di costruzione del nuovo rilevato)

7.6 ANALISI RILEVATO N.3 - DOPPIO BINARIO LATO PAOLA – P43BP

Il rilevato presenta un'altezza massima pari a circa 4.9 m ed è realizzato con scarpate di pendenza 3H:2V; la sezione di riferimento è indicativamente la progressiva 20+153 (sezione P43) e ospiterà una linea a doppio binario. Tale rilevato presenta a lato un rilevato di tipo stradale come da sezione riportata nella figura successiva. Questo rilevato è stato analizzato come rappresentativo (in termini di massima altezza) della sezione di rilevato a doppio binario al fine di valutare i cedimenti attesi. Come già anticipato nei paragrafi precedenti, i rilevati lato Paola verranno trattati con calce.

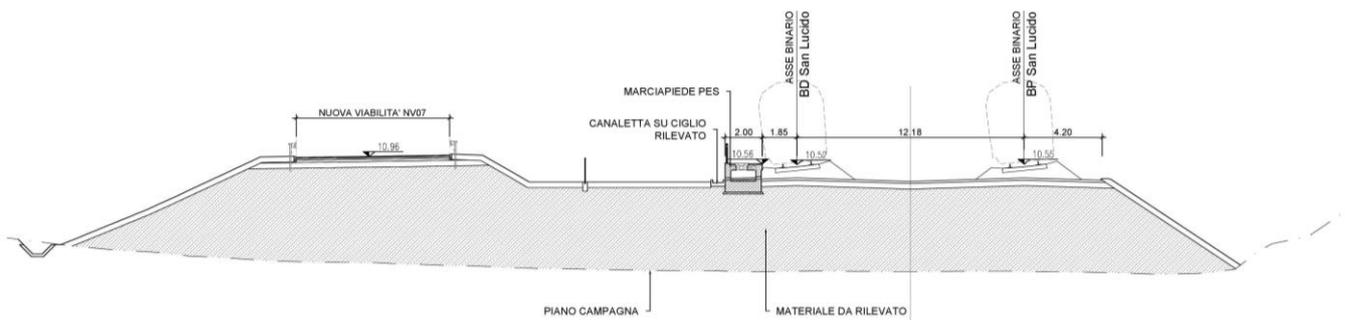


Figura 7.30 – Sezione rilevato in progetto lato Paola

Il modello geotecnico è rappresentato dalla successione stratigrafica caratterizzata dai parametri meccanici sintetizzati nella seguente Tabella 7.5 (vedi relazione geotecnica [9]). La falda di progetto si trova 4 m di profondità dal piano campagna secondo il profilo geotecnico (Doc. Ref [10]).

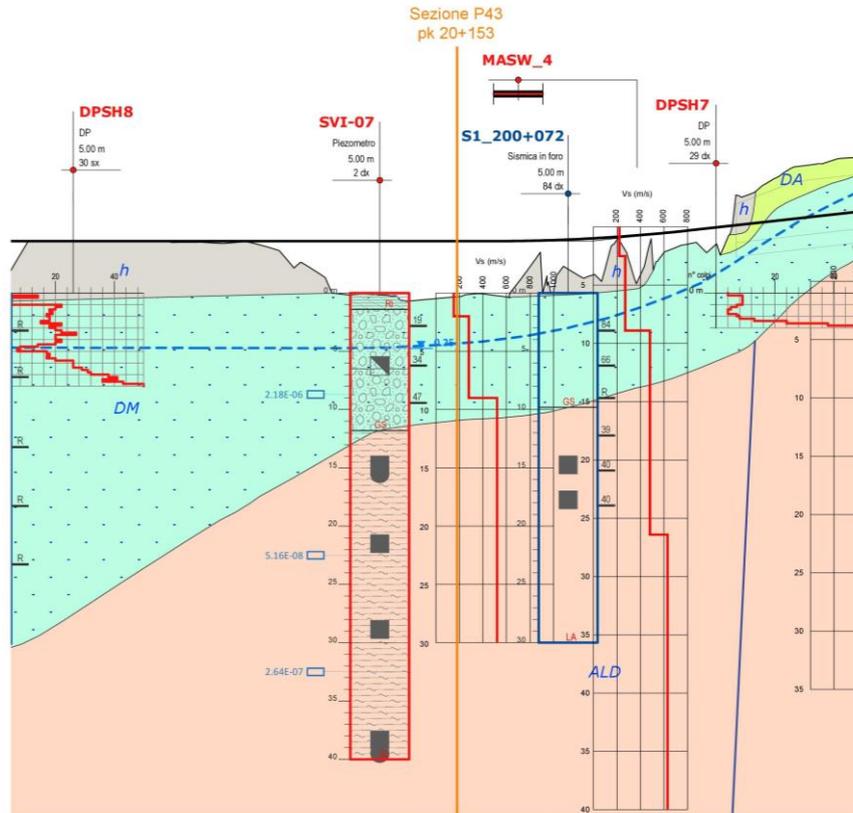


Figura 7.31 – profilo geotecnico in corrispondenza della sezione tipo “rilevato doppio binario”

Le caratteristiche dei materiali da costruzione dei rilevati assunte in progetto sono conformi a quanto previsto nel Manuale di Progettazione RFI e nel Capitolato di Costruzione RFI (Doc. Rif [3][4]). Secondo il profilo geologico, in questa sezione sono stati considerati i seguenti materiali:

U.G.	Legame	Prof. strato	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ' (°)	k (m/s)	E' (MPa)	ν (-)	C_c	C_s	e_{init}	OCR
Rilevato nuovo trattato a calce	MC	-	17.0	50	30	5.8 E-5	30	0.30	-	-	-	-
DM < 0-10m	MC	0-10m	20.0	0	35	2.0 E-6	30	0.30	-	-	-	-
ALD	SS	>10m	20.5	25	24	5.0 E-8	-	0.30	0.158	0.052	0.5	1.5

Tabella 7.7: parametri geotecnici caratteristici.

Con riferimento alla tabella anteriore, i parametri C_c e C_s del materiale ALD si riferiscono rispettivamente all'indice di compressibilità ed all'indice di scarico.

Come definito nella relazione Geotecnica (doc.Rif. [9]), al materiale DM, per i 10 primi metri di profondità, è stato assegnato un valore di modulo elastico E' pari a 30 MPa.

7.6.1 Analisi di stabilità in condizioni statiche e sismiche

In Figura 7.18 è riportata un'immagine del modello di calcolo.

Si fa notare che nonostante i parametri ed i carichi riportati nelle figure corrispondono a quelli con coefficiente unitario, il programma Paratie Plus applica direttamente (i.e. internamente al programma) i coefficienti secondo il codice NTC2018, come spiegato nel capitolo 5.

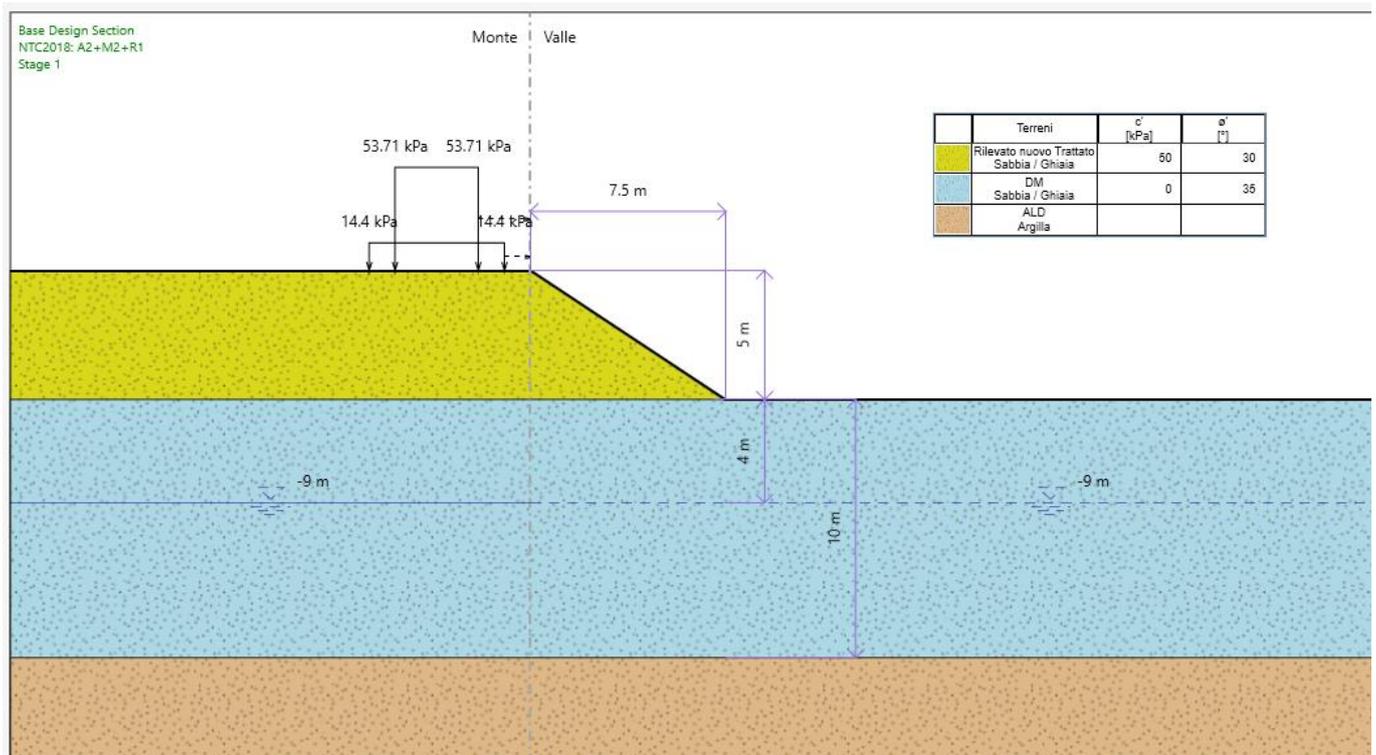


Figura 7.32: modello di calcolo con indicazione dei parametri caratteristici dei materiali.

In Figura 7.19 e Figura 7.21 vengono riportate le superfici di scorrimento analizzate, mentre in Figura 7.20 e Figura 7.22 sono riportate le superfici associate ai fattori di sicurezza minimi ottenuti in condizioni statiche e sismiche.

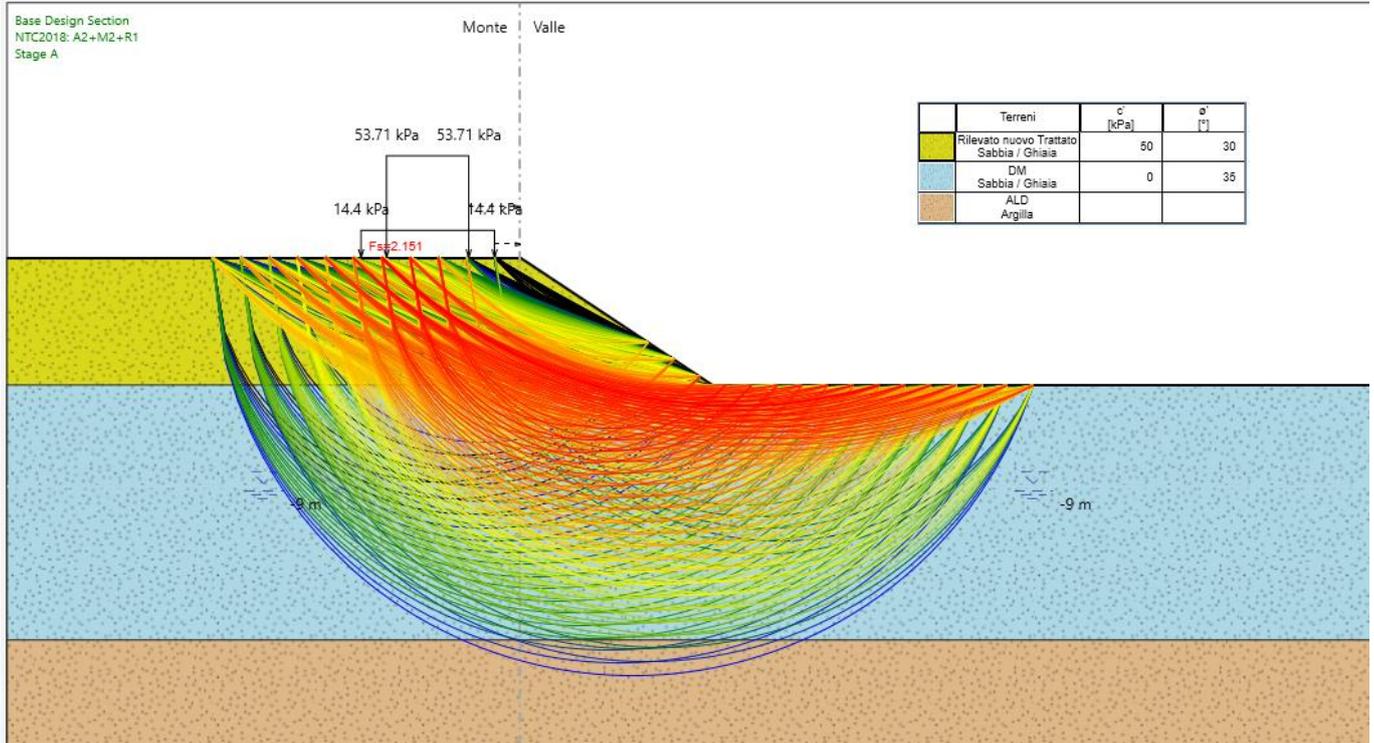


Figura 7.33: analisi di stabilità in condizioni statiche.

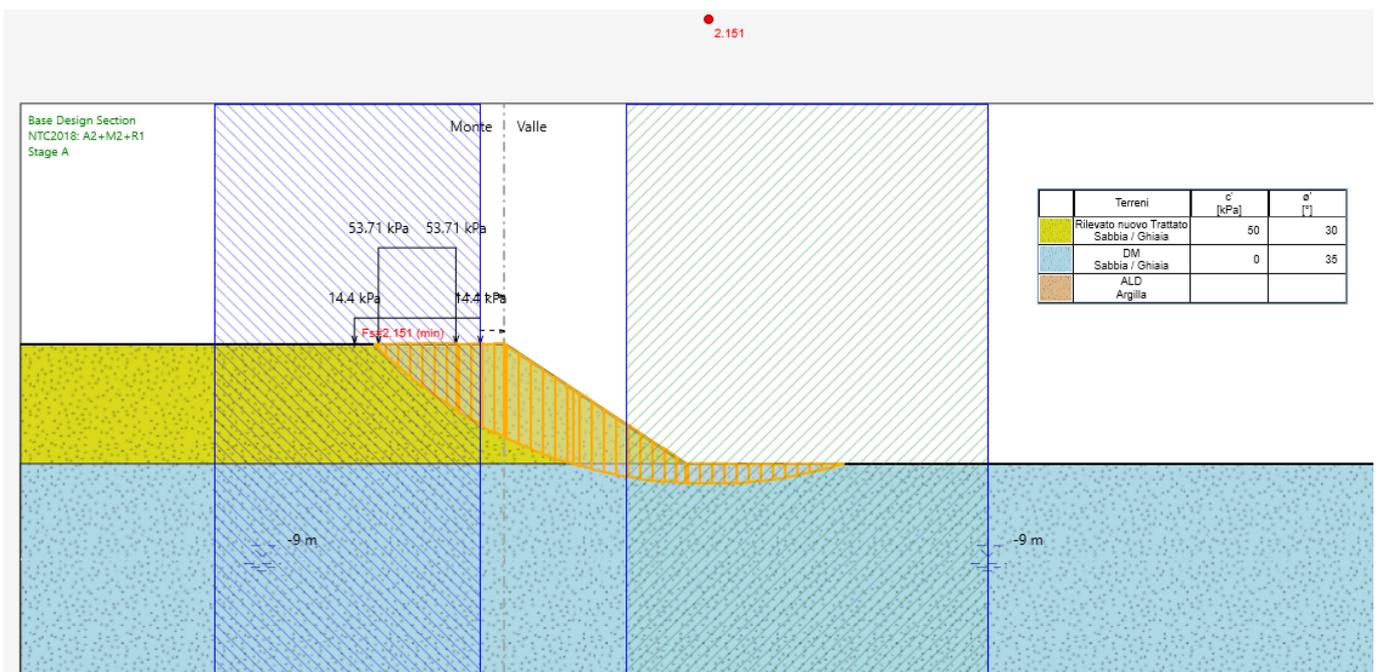


Figura 7.34: superficie critica in condizioni statiche (F_s = 2.15).

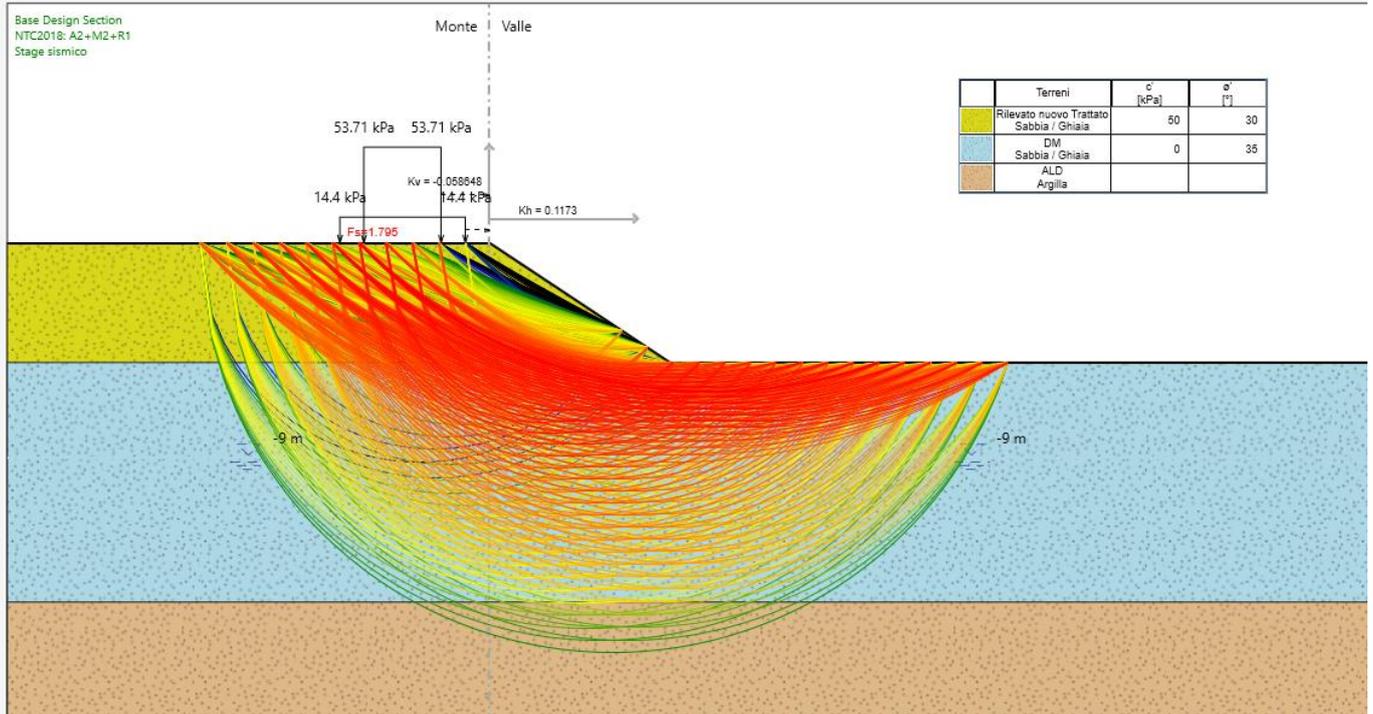


Figura 7.35: analisi di stabilità in condizioni sismiche.

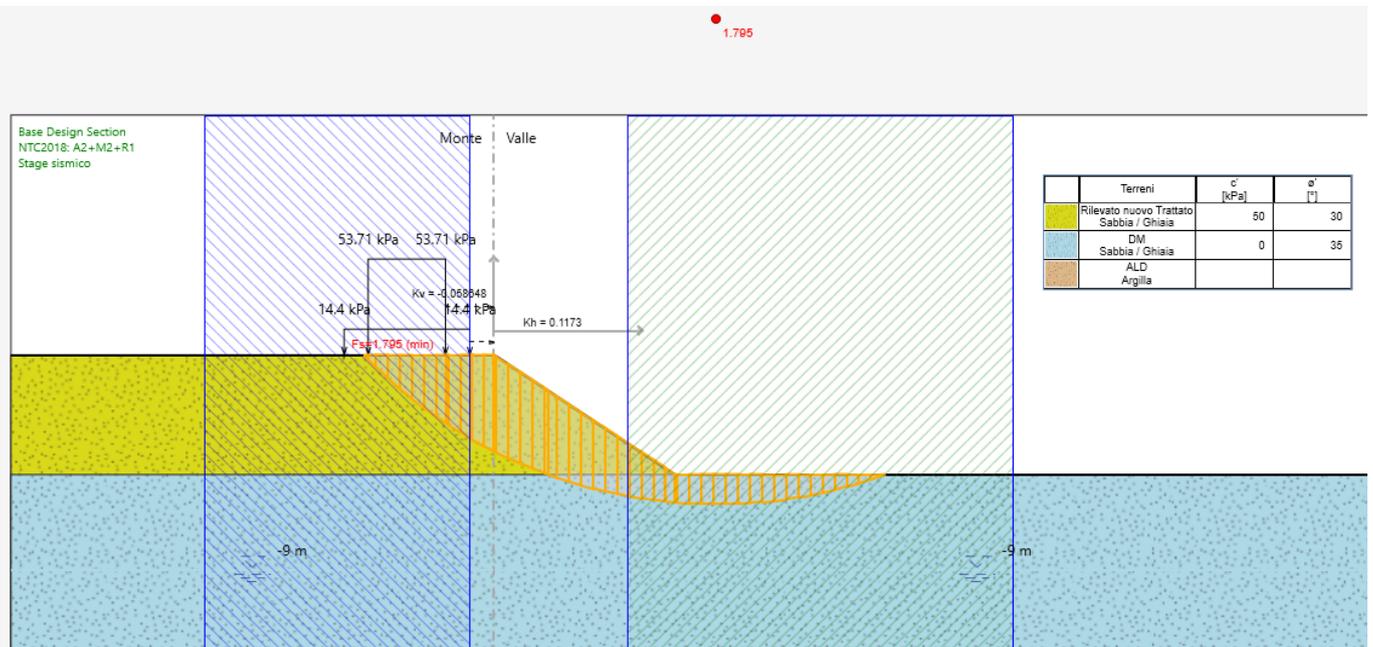


Figura 7.36: superficie critica in condizioni sismiche (FS = 1.80).

Il fattore di sicurezza FS minimo tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

- $FS_{MIN} = 2.15$ in condizioni statiche
- $FS_{MIN} = 1.80$ in condizioni sismiche

essendo soddisfatte rispettivamente le relazioni:

- $FS_{MIN} \geq R2 = 1.1$ in condizioni statiche
- $FS_{MIN} \geq R2 = 1.2$ in condizioni sismiche

la verifica di stabilità globale risulta soddisfatta.

Non viene eseguita alcuna analisi non drenata perché le curve di scorrimento critiche non interessano il materiale coesivo.

7.6.2 Verifica dei cedimenti – modello FEM

La geometria utilizzata è mostrata nella figura seguente. Con rispetto alle condizioni idrauliche al contorno, si permette il flusso in tutte le direzioni (*seepage*). Come definito in precedenza, si può notare che il nuovo rilevato raggiunge un'altezza di circa 5.1 m, mentre il rilevato stradale raggiunge un'altezza di 6.4 m. La falda di progetto si trova 4 m sotto il piano di campagna secondo il profilo geotecnico.

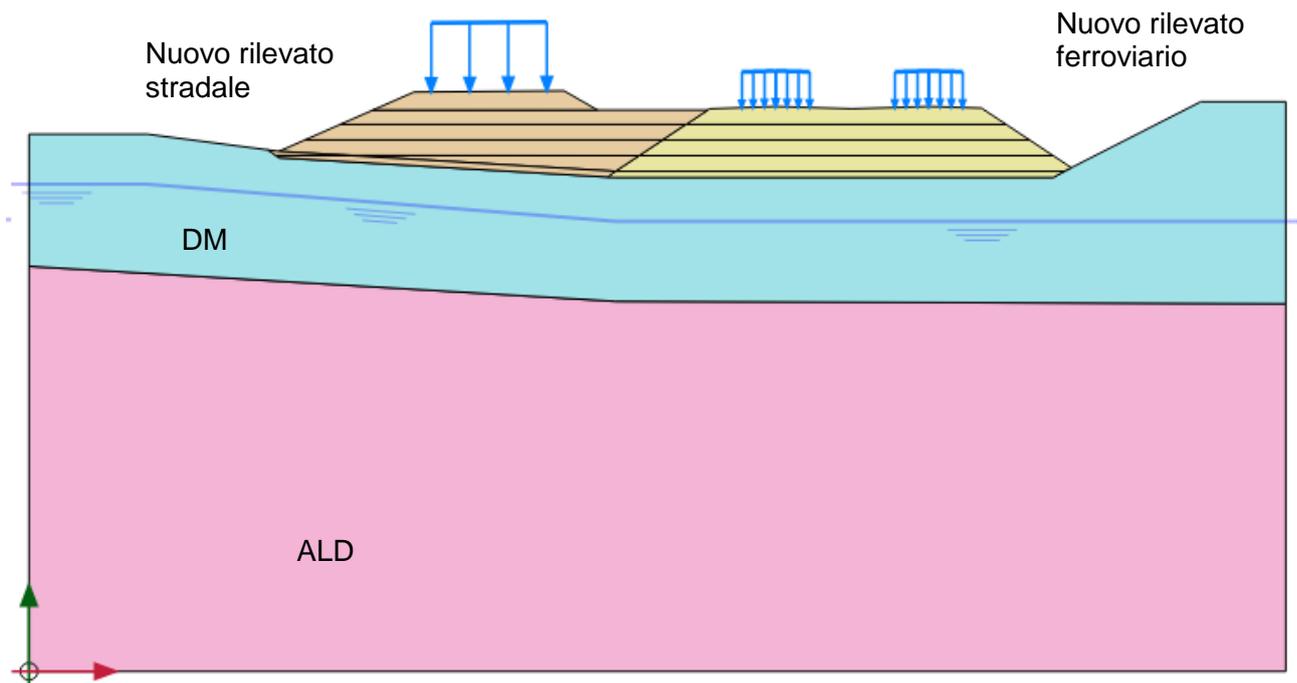


Figura 7.37 Sezione rilevato di analisi in Plaxis

7.6.2.1 Fasi del modello

L'analisi agli elementi finiti effettuata per il modello della sezione tipo P43 che verrà proposta di seguito, è strutturata con le seguenti fasi di calcolo (le fasi da 0 a 3 sono indicative della situazione ante-operam):

0. Fase geostatica di inizializzazione del modello.
1. Scotico 50cm.
2. Costruzione del rilevato ferroviario per strati di circa 1m ogni 10 giorni, quindi 4 step per un totale di 5.1 m in 40 giorni (totale 5.1 m).
3. Costruzione del rilevato stradale per strati di circa 1m ogni 10 giorni, quindi 5 step per un totale di m in 50 giorni (totale 6.4 m).
4. Applicazione del carico dovuto al pacchetto stradale 7 kPa.
5. Consolidazione del rilevato in 174 giorni (costruzione + consolidazione di tutto il rilevato eseguito in 9 mesi).
6. *Reset displacements* per azzeramento cedimenti pre-applicazione ballast + Applicazione del carico dovuto al pacchetto di armamento ferroviario + applicazione carico stradale (20 kPa) in 1 giorno.
7. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 1 settimana.
8. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 2 settimane.
9. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 1 mese.
10. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 2 mesi.
11. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 4 mesi.
12. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 6 mesi.
13. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 1 anno.
14. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 2 anni.
15. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 5 anni.

16. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 10 anni.
17. Analisi di consolidazione ai fini della valutazione dell'entità del cedimento dopo 20 anni.

7.6.2.2 *Spostamenti verticali*

Sono stati analizzati gli spostamenti verticali dopo la costruzione e la consolidazione (durata totale pari a 9 mesi) dei nuovi rilevati (fase 12) e dopo 20 anni di consolidazione (fase 24) per valutare il massimo cedimento residuo dovuto alla consolidazione primaria sulla superficie del rilevato.

Nella Figura 7.24 si possono valutare i cedimenti verticali totali a fine costruzione (Fase 11); il cedimento massimo atteso è pari a 14.2 cm, in corrispondenza della parte centrale del nuovo rilevato, mentre in corrispondenza della superficie di posa del ballast è dell'ordine dei 12 cm. Nella Figura 7.25 è rappresentato il cedimento a fine costruzione del nuovo rilevato (fase 11) in corrispondenza della superficie di posa del ballast.

In figura Figura 7.26 e Figura 7.27 invece si possono vedere i cedimento (totali ed in corrispondenza del coronamento del rilevato) a 20 anni di consolidazione.

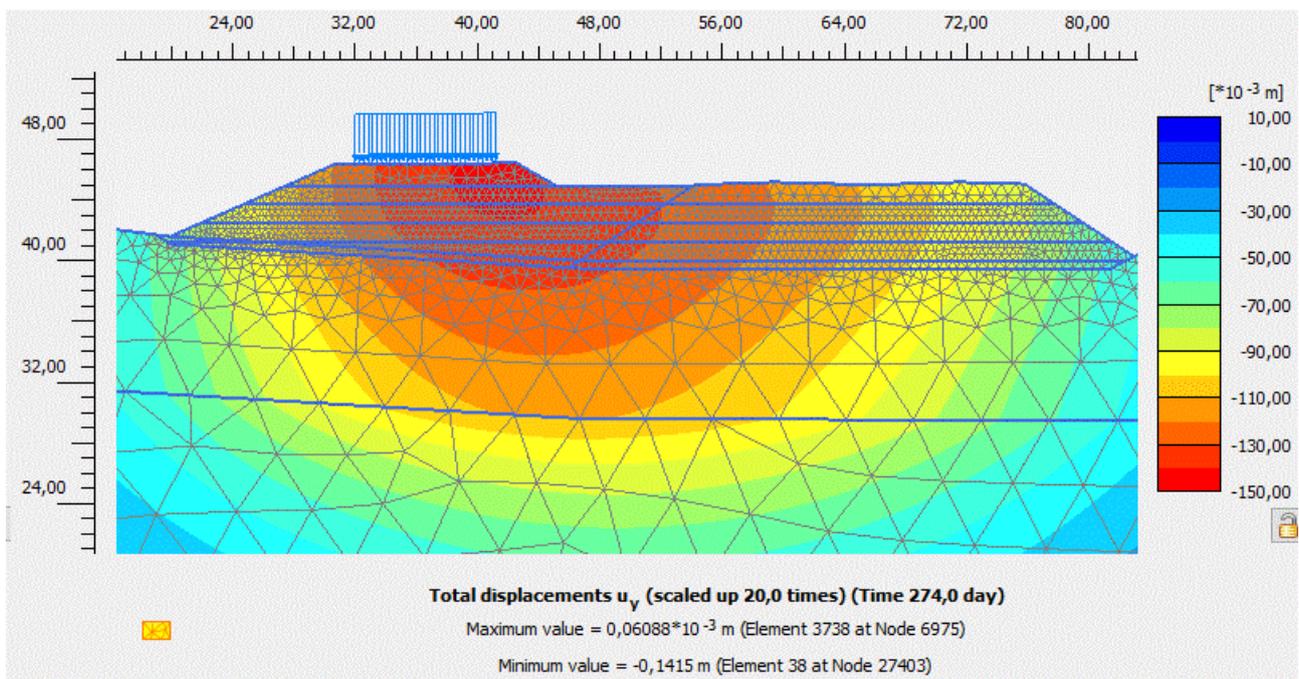


Figura 7.38 Spostamenti verticali al termine della costruzione del rilevato, prima dell'installazione del ballast (fase 12)

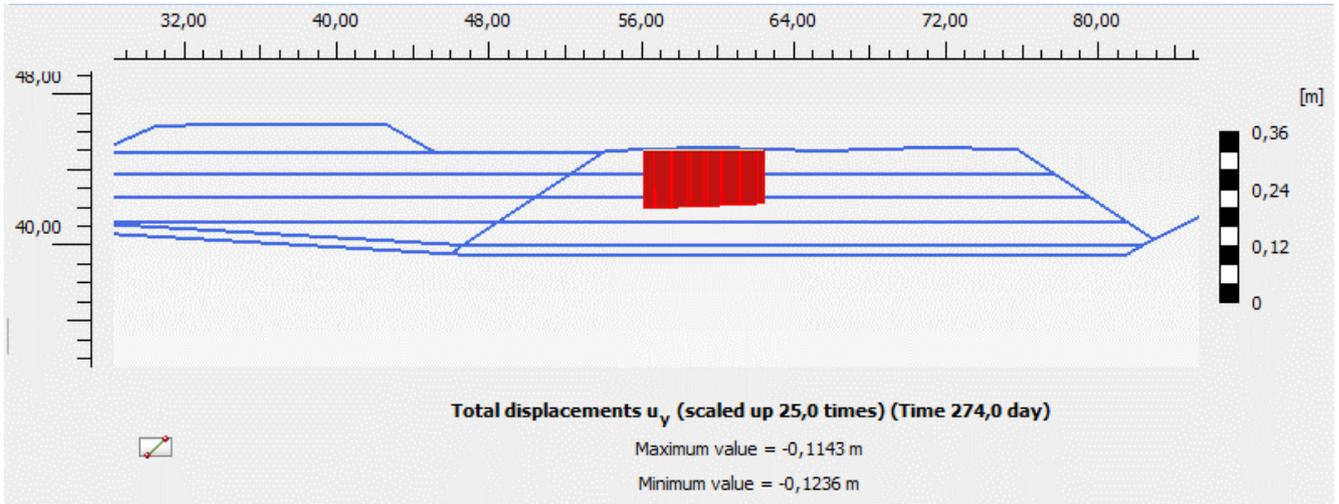


Figura 7.39 Spostamenti verticali in superficie al termine della costruzione del rilevato, prima dell'installazione del ballast (fase 12)

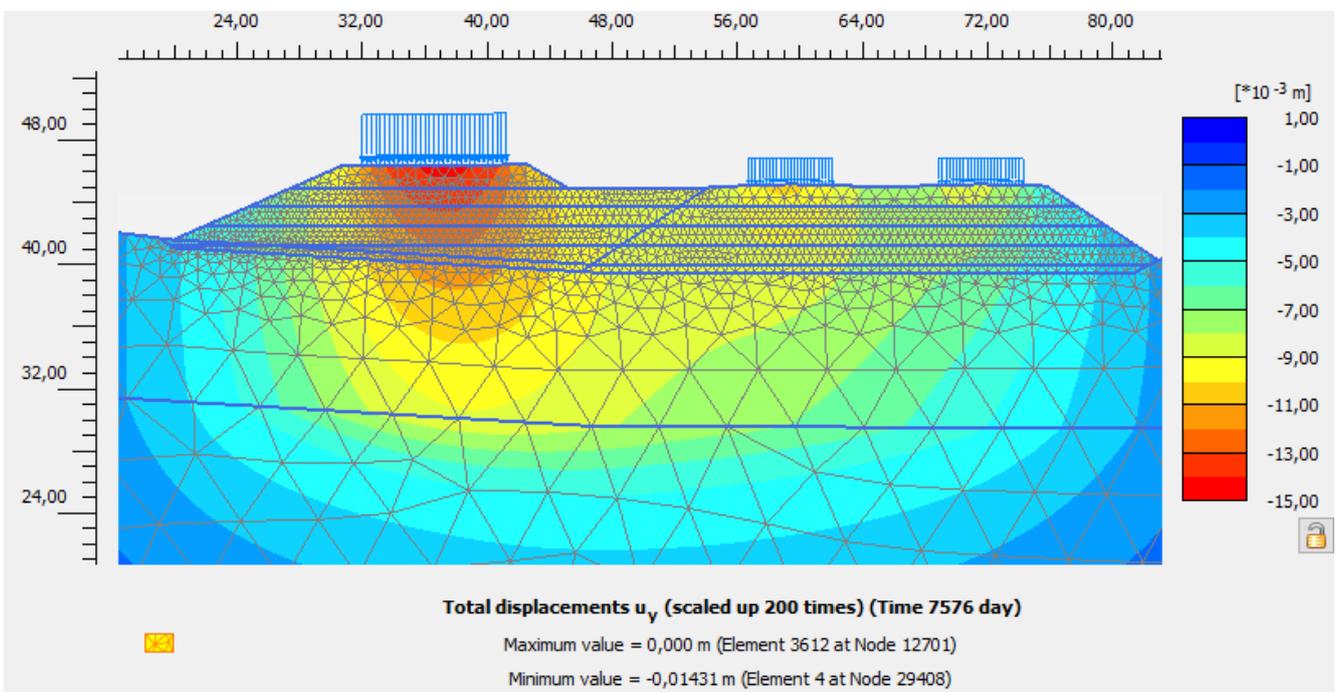


Figura 7.40 Spostamenti verticali residui dopo 20 anni di consolidazione (fase 21)

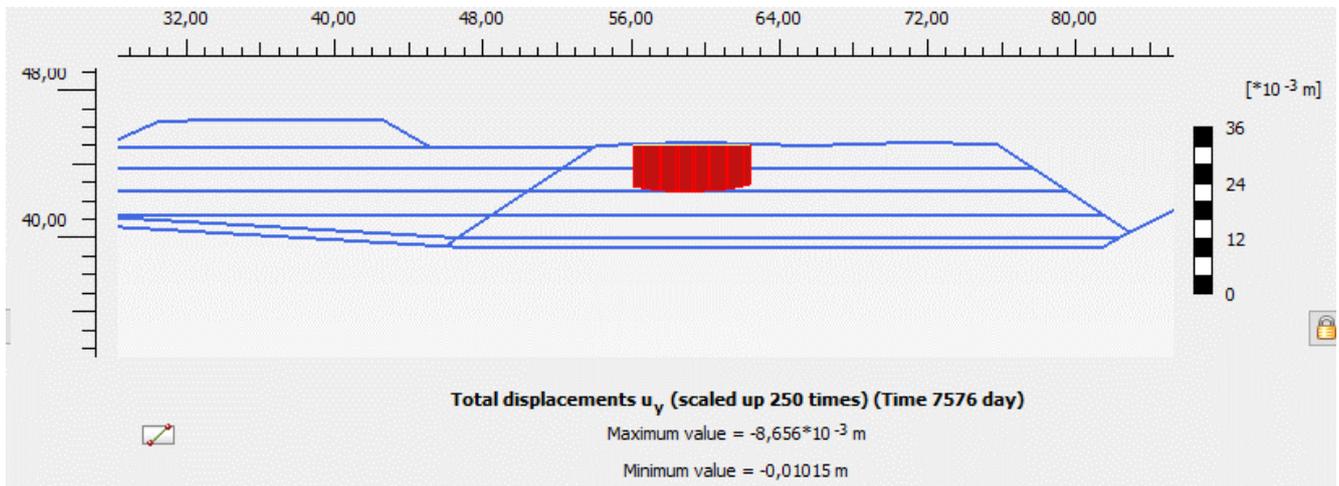


Figura 7.41 Spostamenti verticali residui in superficie dopo 20 anni di consolidazione (fase 24)

Come riscontrabile in figura precedente, il cedimento residuo dovuto alla consolidazione primaria è 1 cm in corrispondenza dell'asse della nuova linea sulla superficie di posa del ballast.

7.6.2.3 Curva cedimenti-tempo

La curva cedimenti-tempo viene estratta in corrispondenza del punto con maggior spostamento verticale del rilevato lungo il piano di posa del ballast. La valutazione dei cedimenti è calcolata a partire dalla fase 12, ovvero la fine della costruzione dei due nuovi rilevati. Tale grafico presenta sull'asse delle ascisse il tempo, espresso in anni, mentre sull'asse delle ordinate viene indicato il cedimento, espresso in mm.

Il cedimento residuo dovuto alla consolidazione primaria a 20 anni (lungo il piano di posa del ballast) risulta circa 1.0 cm.

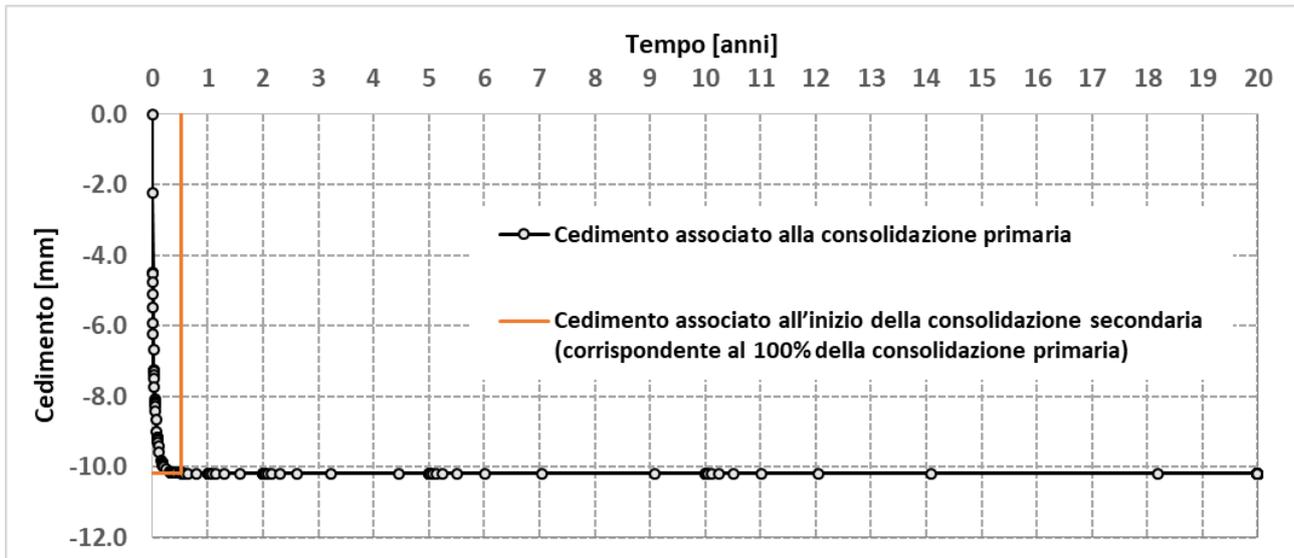


Figura 7.42 Curva cedimenti-tempo Plaxis

Dal grafico è anche possibile ottenere il valore di cedimento e di tempo corrispondenti all'inizio della consolidazione secondaria. In questa fase si è deciso di considerare l'inizio di tale consolidazione nel momento in cui si esaurisce completamente la consolidazione primaria.

Di seguito vengono riepilogati i valori di cedimento primario e il tempo necessario al suo raggiungimento:

- Cedimento corrispondente al 100% della consolidazione primaria: 10.2 mm = 1.02 cm
- Tempo corrispondente al 100% della consolidazione primaria (t_{100}) = 6.24 mesi = 0.52 anni

7.6.2.4 Cedimento residuo totale

Per il calcolo della sedimentazione secondaria si è fatto riferimento al coefficiente $C_{\alpha\varepsilon}$ delle argille ALD calcolato nella relazione geotecnica (Rif. Doc. [9]). Si è considerata come profondità di influenza la larghezza del solo rilevato ferroviario, in quanto rappresentativa di una sezione "tipo". Tale larghezza risulta pari a circa 35 m, stratigraficamente si riscontra uno strato superficiale di DA con potenza di circa 10 m: tale strato data la natura del materiale non dà luogo a cedimenti secondari e quindi non viene considerato all'interno del calcolo. Lo spessore di ALD che risente dell'influenza del nuovo rilevato risulta quindi pari a 25 m.

Il calcolo del cedimento secondario è stato eseguito secondo le indicazioni fornite nel paragrafo 6.2.2.

P43		PA-CO		
Giorni		Ced. associato a Consolidazione Secondaria	<input type="text" value="3.92"/>	cm
Settimane				
Mesi		Ced. associato a Consolidazione Primaria	<input type="text" value="1.02"/>	cm
Anni	0.52			
tc (anni)	20			
h (m)	25			
Calfa,epsilon	0.099%			
t100 (anni)	0.52	Totale =	4.94	cm

Figura 7.43: calcolo dei cedimenti secondari per la sezione tipo P43

Come si vede nella Figura 7.43 precedente, il cedimento secondario risulta pari a 3.92 cm. Complessivamente quindi il cedimento residuo totale (pari a 4.94 cm) risulta inferiore al limite di 5.0 cm, pertanto la verifica è soddisfatta.