

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP: J84H17000930009

**U.O. INFRASTRUTTURE NORD**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA  
TRATTA PIADENA - MANTOVA**

**GEOTECNICA**

Relazione di calcolo rilevati e trincee ferroviari

SCALA:

-

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

N M 2 5    0 3    D    2 6    C L    R I 0 0 0 0    0 0 1    A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Definitiva	C Grossi	Aprile 2020	P. Scarano <i>P. Scarano</i>	Aprile 2020	M. Berlingieri <i>MB</i>	Aprile 2020	A. Perego Aprile 2020



File: NM2503D26CLRI0000001A.docx

n. Elab.:

## INDICE

<b>1. PREMESSA.....</b>	<b>5</b>
<b>2. INTRODUZIONE.....</b>	<b>7</b>
<b>3. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....</b>	<b>8</b>
3.1 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO E DI BASE.....	8
3.2 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO.....	8
3.3 SOFTWARE.....	9
<b>4. DESCRIZIONE DEL TRACCIATO.....</b>	<b>10</b>
<b>5. CRITERI DI VERIFICA IN ACCORDO ALLE NTC2018.....</b>	<b>14</b>
5.1 GENERALE.....	14
5.2 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI.....	15
5.2.1 <i>Verifiche Stati Limite Ultimi (SLU)</i> .....	15
5.2.2 <i>Verifiche Stati limite di esercizio (SLE)</i> .....	17
5.3 STABILITÀ DEL SITO NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE.....	18
5.4 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI.....	19
5.4.1 <i>Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche</i> .....	19
5.4.2 <i>Verifiche Stati limite ultimi (SLU)</i> .....	20
5.4.3 <i>Stati limite di esercizio (SLE)</i> .....	21
<b>6. COEFFICIENTI SISMICI PER LE VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE.....</b>	<b>22</b>
<b>7. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA.....</b>	<b>23</b>
7.1 CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI.....	23
7.1.1 <i>Slope/W</i> .....	23
7.1.2 <i>Plaxis 2D</i> .....	23
7.2 METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE.....	24
7.2.1 <i>Verifiche di stabilità</i> .....	24

7.2.2	Valutazione degli spostamenti.....	24
<b>8.</b>	<b>CARATTERISTICHE DEL CORPO FERROVIARIO .....</b>	<b>25</b>
8.1	GEOMETRIA DEI RILEVATI FERROVIARI .....	25
8.2	GEOMETRIA DELLE TRINCEE FERROVIARIE .....	26
8.3	MATERIALI E PARAMETRI GEOTECNICI .....	26
8.4	CARICHI DI PROGETTO .....	26
8.4.1	Carichi ferroviari per le Verifiche SLU.....	28
8.4.2	Carichi ferroviari per le Verifiche SLE.....	29
<b>9.</b>	<b>SELEZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO.....</b>	<b>30</b>
<b>10.</b>	<b>SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 57+600 .....</b>	<b>31</b>
10.1	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO .....	31
10.2	CARICHI DI PROGETTO .....	32
10.3	VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE .....	32
10.3.1	Risultati .....	33
10.4	VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI .....	36
10.4.1	Modelli e fasi di calcolo.....	36
10.4.2	Risultati .....	39
<b>11.</b>	<b>SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 58+075 (VIADOTTO VI01).....</b>	<b>47</b>
11.1	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO .....	47
11.2	CARICHI DI PROGETTO .....	48
11.3	VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE .....	48
11.3.1	Risultati .....	49
11.4	VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI .....	52
11.4.1	Modelli e fasi di calcolo.....	52
11.4.2	Risultati .....	54
<b>12.</b>	<b>SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 67+150 (VIADOTTO SUL FIUME OGLIO VI02) .....</b>	<b>61</b>

12.1	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO .....	61
12.2	CARICHI DI PROGETTO .....	62
12.3	VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE .....	62
12.3.1	<i>Risultati</i> .....	63
12.4	VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI .....	71
12.4.1	<i>Modelli e fasi di calcolo</i> .....	71
12.4.2	<i>Risultati</i> .....	73
<b>13.</b>	<b>SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 63+250 .....</b>	<b>80</b>
13.1	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO .....	80
13.2	CARICHI DI PROGETTO .....	81
13.3	VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE .....	81
13.3.1	<i>Risultati</i> .....	82

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>5 di 87</b>

## 1. PREMESSA

Nel Programma Regionale Mobilità e Trasporti della Regione Lombardia è riportata la pianificazione di “Riqualificazione Milano – Codogno – Cremona - Mantova”. Tale voce, oltre a citare gli interventi di raddoppio conclusi nel 2015 tra la località Cavatigozzi e Cremona, riporta anche l’intervento di raddoppio, proposto in maniera selettiva, sull’intera relazione.

Recentemente sulla linea sono stati firmati impegni e convenzioni attuative che hanno interessato la Regione Lombardia e Rete Ferroviaria Italiana. L’obiettivo commerciale, alla base di questi interventi, è creare le condizioni per l’incremento della regolarità sulla relazione regionale Milano – Mantova ed un suo successivo potenziamento, nonché raggiungere la frequenza di un treno/h per direzione. Successivi approfondimenti svolti dalle strutture territoriali di RFI congiuntamente alla Regione Lombardia, hanno messo in evidenza la necessità di approfondire la tratta prioritaria di raddoppio, anche alla luce del modello di esercizio che sarà adottato dalla Regione stessa.

La linea ha inoltre un notevole interesse merci legato, non solo alla presenza degli impianti industriali raccordati, ma anche al fatto che tale linea fa parte del corridoio alternativo al Mediterraneo. In quest’ottica, il presente Progetto Definitivo, compendia gli interventi necessari, nell’ambito della linea Codogno – Cremona – Mantova, all’attivazione prioritaria della tratta Piadena – Mantova, 1^ fase funzionale del raddoppio della linea in oggetto. L’opera si sviluppa nella bassa pianura lombarda, ad una quota compresa tra i 60 e i 20 metri s.l.m. andando da ovest verso est; lo sviluppo della tratta è di circa 34km tra le località di Piadena (km 55+286 LS) e Mantova (km 89+557 LS).

La 1^ fase del progetto prevede i seguenti interventi:

- Raddoppio tratta Piadena – Bozzolo: raddoppio con tratti in variante tramite la realizzazione di un nuovo binario ad interasse di circa 22.50 m dall’attuale, da eseguirsi in presenza di esercizio ferroviario;
- Raddoppio tratta Bozzolo – Mantova: raddoppio in stretto affiancamento da eseguirsi in interruzione prolungata di esercizio ferroviario.

Il progetto prevede, nell'ambito della realizzazione nuova della sede ferroviaria a doppio binario, dei relativi impianti ed apparati tecnologici e di trazione elettrica, inoltre la riqualificazione delle Stazioni e dei PRG di Piadena, Bozzolo e Marcaria, della Fermata di Castellucchio e del PRG di Mantova. È prevista, ancora, la soppressione di tutti i PL di linea tramite realizzazione di opportune nuove opere sostitutive. L'intervento, nel suo complesso, grazie all'incremento delle prestazioni della linea, si caratterizza come un potenziamento dei collegamenti regionali e merci attualmente programmati.

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA NM25	LOTTO 03 D 26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A	FOGLIO 7 di 87

## 2. INTRODUZIONE

Il presente documento riporta le verifiche geotecniche, ai sensi della Normativa vigente (NTC 2018), relative alle sezioni caratteristiche dei tratti in rilevato e in trincea nell'ambito del Progetto Definitivo del raddoppio ferroviario della tratta Piacenza – Mantova, definita Lotto 3 e facente parte del Progetto Definitivo del raddoppio della tratta Codogno – Cremona – Mantova. Per quanto concerne le opere stradali si rimanda ai documenti dedicati.

La relazione si articola come segue:

- il capitolo 3 elenca i documenti, le normative e la bibliografia di riferimento;
- il capitolo 4 riporta una breve descrizione del tracciato in esame;
- il capitolo 5 riporta i criteri generali di progettazione in accordo alla Normativa vigente (NTC 2018);
- il capitolo 6 contiene la definizione dell'azione sismica di progetto da utilizzare nelle verifiche;
- il capitolo 7 riporta una breve descrizione dei codici di calcolo utilizzati per le verifiche effettuate;
- il capitolo 8 riporta la descrizione del corpo ferroviario in esame da un punto di vista geometrico, le caratteristiche geotecniche dei materiali costituenti il rilevato e i sovraccarichi presenti;
- il capitolo 9 riporta una breve descrizione delle sezioni analizzate;
- i capitoli 10, 11, 12 e 13 riportano le sezioni analizzate per la tratta in esame, le stratigrafie ed i parametri geotecnici assunti nelle analisi, le verifiche condotte ed i risultati ottenuti.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE</b> <b>FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>8 di 87</b>

### 3. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

#### 3.1 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO E DI BASE

Si riporta di seguito l'elenco dei documenti utilizzati per la stesura della presente relazione:

- [1] ITALFERR – Progetto Definitivo – Raddoppio Linea Codogno-Cremona-Mantova, tratta Piadena-Mantova – Relazione geotecnica generale (Doc. Rif. – NM2503D26GE0006001A)
- [2] ITALFERR – Progetto Definitivo – Raddoppio linea Codogno – Cremona – Mantova, Tratta Piadena – Mantova – Geotecnica – Profilo geotecnico in asse tracciato – da Tav.1/23 a Tav.23/23 (Doc. da NM25 03 D 26 F6 GE0006 001 A a Doc. NM25 03 D 26 F6 GE0006 023 A)

#### 3.2 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO

- [3] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n.29 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.30.
- [4] 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”
- [5] RFI DTC SI MA IFS 001 C del 21.12.2018- “MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI”.
- [6] RFI DTC INC CS LG IFS 001 A del 21.12.2011 – “Linee guida per il collaudo statico delle opere in terra”.
- [7] RFI DTC SI SP IFS 001 C del 21.12.2018- Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Parte II – Sezione 5 – “Opere in terra e scavi” – RFI.
- [8] RFI DTC SI GE SP IFS 003 A del 22.12.2017- Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Parte II – Sezione 18 – “Utilizzo di aggregati riciclati e trattamenti con calce per opere in terra”– RFI.
- [9] RFI TCAR ST AR 01 001 D “Standard di qualità geometrica del binario e parametri di dinamica di marcia per linee con velocità fino a 300km/h”
- [10] Regolamento (UE) N.1299/2014 della Commissione del 18 Novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario dell'Unione

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>												
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NM25</td> <td>03 D 26</td> <td>CL</td> <td>RI0000 001</td> <td>A</td> <td>9 di 87</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	NM25	03 D 26	CL	RI0000 001	A	9 di 87
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
NM25	03 D 26	CL	RI0000 001	A	9 di 87								

Europea, modificato dal Regolamento di esecuzione (UE) N°2019/776 della Commissione del 16 Maggio 2019

- [11] UNI EN 1997-1: Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali
- [12] UNI EN 1998-5: Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

### 3.3 SOFTWARE

- [13] SLope\W – GeoSlope ([www.geo-slope.com](http://www.geo-slope.com))
- [14] PLAXIS B.V.. “Plaxis – Finite Element Code for Soil and Rock Analyses”. Plaxis 2D – AE.02. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherland. ([http:// w.plaxis.nl](http://w.plaxis.nl))

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>10 di 87</b>

#### 4. DESCRIZIONE DEL TRACCIATO

Il lotto funzionale denominato Lotto 3 del progetto di raddoppio ferroviario della linea Codogno – Cremona - Mantova comprende la tratta tra le stazioni di Piadena (km 55+286 LS) e Mantova (km 89+557 LS). Complessivamente sono circa 34 km che attraversano i comuni di Piadena, Tornata, Bozzolo, Marcaria, Castelluccio, Curtatone per arrivare alla stazione di Mantova (si veda Figura 3.1). La tratta in oggetto è interamente ubicata nella bassa pianura lombarda ed attraversa due importanti fiumi, il fiume Oglio e il fiume Mincio; il piano campagna varia gradualmente andando da Ovest ad Est da circa + 33 m slmm a circa +20 m slmm.

Il tracciato di raddoppio della linea è previsto principalmente a Sud della linea ferroviaria esistente. La realizzazione del raddoppio è prevista tra le stazioni di Piadena e Bozzolo (km 63+600 ca.), mediante la costruzione di una nuova sede a doppio binario in variante mantenendo in esercizio la linea storica, e tra le stazioni di Bozzolo e Mantova in stretto affiancamento alla linea storica, prevedendo l'interruzione dell'esercizio ferroviario. Contestualmente il progetto prevede la realizzazione di diverse opere stradali di attraversamento.

Di seguito si riporta una descrizione del tracciato in progetto suddiviso per tratte omogenee che prendono in considerazione le altezze dei nuovi rilevati e trincee lungo linea.

Dall'analisi del tracciato sono state individuate le seguenti tratte lungo le quali la linea ferroviaria si sviluppa in rilevato:

- Dal km 55+286 ca. al km 57+725 ca.: il raddoppio della linea è previsto in affiancamento rispetto alla linea esistente, mantenendone l'esercizio. In questa tratta la linea in progetto si sviluppa in rilevato con altezze che variano tra valori prossimi al pc, fino a raggiungere altezze massime pari a 2.5 m ca. L'interasse tra linea storica e linea in progetto è pari a 5.5 m ca. fino al km 56+700, aumenta poi progressivamente fino a 20.0 m al km 57+725.
- Dal km 57+725 ca. al km 61+750 ca.: il raddoppio della linea è previsto in variante rispetto alla linea esistente, mantenendone l'esercizio. In questa tratta la linea in progetto si sviluppa in rilevato con altezze che raggiungono un valore massimo pari a 4.0 m ca in prossimità del viadotto VI01 (km 58+075). L'interasse tra linea storica e linea in progetto da 24 m aumenta fino a raggiungere 100 m ca. in prossimità del VI01 per poi ridursi a 24.0 m ca. al km 58+900 e da qui rimane costante.

- Dal km 63+600 ca. (Stazione di Bozzolo) al km 66+150 ca.: il raddoppio della linea è previsto in affiancamento alla linea storica, prevedendone l'interruzione dell'esercizio ferroviario. In questa tratta la linea in progetto si sviluppa in rilevato con altezze variabili che raggiungono un valore massimo pari a 3 m ca. In media l'interasse tra linea storica e linea in progetto è pari a 5.5 m ca.
- Dal km 66+150 ca. al km 68+200 ca.: il raddoppio della linea è previsto in affiancamento alla linea storica, prevedendone l'interruzione dell'esercizio ferroviario. In questa tratta la linea in progetto si sviluppa in rilevato con altezze variabili che raggiungono un valore massimo pari a circa 11.0 m in corrispondenza dei rilevati di approccio delle spalle del viadotto Oglio VI02 (dal km 67+178 al km 67+400). L'interasse tra linea storica e linea in progetto è pari a 5.5 m ca fino al km 66+700, aumenta progressivamente fino a un valore di 26.5 m ca in corrispondenza della spalla Ovest del viadotto Oglio, si mantiene poi costante fino alla spalla Est per poi ridursi progressivamente fino a 4.0 m ca in prossimità del km 68+000.
- Dal km 69+900 ca. al km 78+200 ca.: il raddoppio della linea è previsto in affiancamento alla linea storica, prevedendone l'interruzione dell'esercizio ferroviario. La linea ferroviaria si sviluppa in rilevato con altezze variabili come segue:
  - dal km 69+900 al km 70+600 l'altezza massima dei rilevati è pari a 2.5 m ca.;
  - dal km 70+600 al km 74+770 i rilevati raggiungono un'altezza massima pari a circa 5.0 m in corrispondenza dei rilevati di approccio al Ponte a doppia vasca (VI03 dal km 71+360 al km 71+374);
  - dal km 74+770 al km 78+200 l'altezza massima dei rilevati è pari a 2.0 m ca.

L'interasse tra linea storica e linea in progetto è in media pari a 4.0 m ca.

- Dal km 79+650 ca. al km 85+900 ca: il raddoppio della linea è previsto in affiancamento alla linea storica, prevedendone l'interruzione dell'esercizio ferroviario. La linea si sviluppa in rilevato con altezze massime dei rilevati pari a circa 2.5 m. L'interasse tra linea storica e linea in progetto è in media pari a 4.0 m ca.

Dall'analisi del tracciato sono state individuate le seguenti tratte lungo le quali la linea ferroviaria si sviluppa principalmente a raso o in trincea:

- Dal km 61+750 ca. al km 63+800 ca. (Stazione di Bozzolo): il raddoppio della linea è previsto in affiancamento rispetto alla linea esistente, mantenendone l'esercizio. La linea si sviluppa principalmente

a raso o in trincea con altezza massima delle trincee pari a circa 3.0 m al km 63+250. L'interasse tra linea storica e linea in progetto è pari a circa 5.5 m.

- Dal km 68+200 ca. al km 69+900 ca.: il raddoppio della linea è previsto in affiancamento alla linea storica, prevedendone l'interruzione dell'esercizio ferroviario. In questa tratta la linea si sviluppa principalmente a raso o in trincea con altezza massima delle trincee dell'ordine di 1.5 m ca. L'interasse tra linea storica e linea in progetto è in media pari a 4.0 m ca.
- Dal km 78+200 ca. al km 79+650 ca: il raddoppio della linea è previsto in affiancamento alla linea storica, prevedendone l'interruzione dell'esercizio ferroviario. La linea si sviluppa principalmente a raso o in trincea con altezza massima delle trincee dell'ordine di 1.5 m ca. L'interasse tra linea storica e linea in progetto è in media pari a 4.0 m ca.
- Dal km 85+900 ca. al km 88+800 ca (Stazione di Mantova): il raddoppio della linea è previsto in affiancamento alla linea storica, prevedendone l'interruzione dell'esercizio ferroviario. Fino al km 87+000 la linea si sviluppa principalmente a raso o in trincea con altezza massima delle trincee dell'ordine di 1.0 m ca., successivamente si entra nel centro abitato e saranno previsti muri in dx e sx fino alla stazione di Mantova. L'interasse tra linea storica e linea in progetto è in media pari a 4.0 m ca.



**Figura 4.1: Tracciato di progetto - Google Earth, immagini 2019**

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA NM25	LOTTO 03 D 26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A	FOGLIO 14 di 87

## 5. CRITERI DI VERIFICA IN ACCORDO ALLE NTC2018

### 5.1 GENERALE

Per le opere in esame devono essere svolte le seguenti verifiche di sicurezza e delle prestazioni attese (par. 6.2.3. del Doc. Rif. [3]):

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

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

$$E_d \leq R_d \quad (\text{Eq. 6.2.1 del Doc. Rif. [3]})$$

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. 6.2.3.1 del Doc. Rif. [3]).

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

$$E_d \leq C_d \quad (\text{Eq. 6.2.7 del Doc. Rif. [3]})$$

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. All'interno del progetto devono essere quindi definite le prescrizioni relative agli spostamenti compatibili per l'opera e le prestazioni attese.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE</b> <b>FERROVIARI</b>	COMMESSA NM25	LOTTO 03 D 26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A	FOGLIO 15 di 87

## 5.2 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI

In base a quanto indicato dalle NTC2018 le verifiche di sicurezza che devono essere condotte per opere costituite da materiali sciolti sono le seguenti.

### 5.2.1 Verifiche Stati Limite Ultimi (SLU)

Le verifiche di stabilità in campo statico di opere in materiali sciolti, quali rilevati, devono essere eseguite secondo il seguente approccio (Par. 6.8.2 del Doc. Rif. [3]):

Approccio 1 - Combinazione 2: A2 + M2 + R2 tenendo conto dei coefficienti parziali definiti in Tabella 5.1, Tabella 5.4 e Tabella 5.5 (rispettivamente Tab.6.2.I, Tab.6.2.II e Tab.6.8.I del Doc. Rif. [3]).

La verifica di stabilità globale si ritiene soddisfatta se:

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

essendo R la resistenza globale del sistema (Par. C.6.8.6.2 del Doc. Rif. [4]), calcolata sulla base delle azioni di progetto, dei parametri di progetto e della geometria di progetto ( $R = R \left[ \gamma_F \cdot F_k; \frac{X_k}{\gamma_m}; a_d \right]$ ).

La stabilità globale dell'insieme manufatto-terreno di fondazione deve essere studiata nelle condizioni corrispondenti alle diverse fasi costruttive ed al termine della costruzione.

Facendo riferimento a quanto previsto al p.to 3.5.2.3.8 del Manuale di Progettazione RFI DINIC MA CS 00 001 C, parte IV (Doc. Rif. [5]), per le verifiche agli stati limite ultimi si adottano i valori dei coefficienti parziali definiti in Tabella 5.1 (Tab. 6.2.I del Doc. Rif. [3]) e i coefficienti di combinazione  $\psi$  definiti in Tabella 5.2 e Tabella 5.3 (Tab. 5.2.VI e Tab. 5.2. VII del Doc. Rif. [3]).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>

**Tabella 5.1: Coefficienti parziali sulle azioni (Tab. 6.2.I del Doc. Rif. [3])**

**Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni**

	Effetto	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti $G_1$	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

<sup>(1)</sup> Per i carichi permanenti  $G_2$  si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti  $\gamma_{G1}$

In Tabella 5.1 (Tab. 5.2.V del Doc. Rif. [3]) il significato dei simboli è il seguente:

$\gamma_{G1}$  = coefficiente parziale del peso proprio della struttura, del terreno e dell'acqua, quando pertinente;

$\gamma_{G2}$  = coefficiente parziale dei pesi propri degli elementi non strutturali;

$\gamma_{Qi}$  = coefficiente parziale delle azioni variabili.

**Tabella 5.2: Coefficienti di combinazione  $\psi$  delle azioni (Tab. 5.2.VI del Doc. Rif. [3])**

**Tab. 5.2.VI - Coefficienti di combinazione  $\Psi$  delle azioni**

Azioni		$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Azioni singole	Carico sul rilevato a tergo delle spalle	0,80	0,50	0,0
da traffico	Azioni aerodinamiche generate dal transito dei convogli	0,80	0,50	0,0
Gruppi di carico	$gr_1$	0,80 <sup>(2)</sup>	0,80 <sup>(1)</sup>	0,0
	$gr_2$	0,80 <sup>(2)</sup>	0,80 <sup>(1)</sup>	-
	$gr_3$	0,80 <sup>(2)</sup>	0,80 <sup>(1)</sup>	0,0
	$gr_4$	1,00	1,00 <sup>(1)</sup>	0,0
Azioni del vento	$F_{Wk}$	0,60	0,50	0,0
Azioni da neve	in fase di esecuzione SLU e SLE	0,80 0,0	0,0 0,0	0,0 0,0
Azioni termiche	$T_k$	0,60	0,60	0,50

<sup>(1)</sup> 0,80 se è carico solo un binario, 0,60 se sono carichi due binari e 0,40 se sono carichi tre o più binari.

<sup>(2)</sup> Quando come azione di base venga assunta quella del vento, i coefficienti  $\psi_0$  relativi ai gruppi di carico delle az

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>

**Tabella 5.3: Coefficienti di combinazione  $\psi$  delle azioni (Tab. 5.2.VII Doc. Rif. [3])**

Tab. 5.2.VII - *Ulteriori coefficienti di combinazione  $\psi$  delle azioni*

	Azioni	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Azioni singole da traffico	Treno di carico LM 71	0,80 <sup>(3)</sup>	<sup>(1)</sup>	0,0
	Treno di carico SW /0	0,80 <sup>(3)</sup>	0,80	0,0
	Treno di carico SW/2	0,00 <sup>(3)</sup>	0,80	0,0
	Treno scarico	1,00 <sup>(3)</sup>	-	-
	Centrifuga	<sup>(2)</sup> <sup>(3)</sup>	<sup>(2)</sup>	<sup>(2)</sup>
	Azione laterale (serpeggio)	1,00 <sup>(3)</sup>	0,80	0,0

<sup>(1)</sup> 0,80 se è carico solo un binario, 0,60 se sono carichi due binari e 0,40 se sono carichi tre o più binari.

<sup>(2)</sup> Si usano gli stessi coefficienti  $\psi$  adottati per i carichi che provocano dette azioni.

<sup>(3)</sup> Quando come azione di base venga assunta quella del vento, i coefficienti  $\psi_0$  relativi ai gruppi di carico delle azioni da traffico vanno assunti pari a 0,0.

**Tabella 5.4: Coefficienti parziali sui terreni (M1 ed M2) - (Tab. 6.2.II, del Doc. Rif. [3])**

Tab. 6.2.II – *Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno*

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale $\gamma_M$	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coazione efficace	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_r$	$\gamma_r$	1,0	1,0

**Tabella 5.5: Coefficienti parziali per le verifiche di stabilità globale (R2) -in campo statico (Tab. 6.8.I, Doc. Rif. [3])**

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

COEFFICIENTE	R2
$\gamma_R$	1,1

### 5.2.2 Verifiche Stati limite di esercizio (SLE)

Deve essere verificato, mediante analisi effettuate impiegando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici dei materiali (Par. 6.5.3.2 del Doc. Rif. [3]), che gli spostamenti dell'opera in esame e

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>18 di 87</b>

del terreno circostante siano compatibili con la funzionalità della struttura e con la sicurezza e la funzionalità di manufatti adiacenti.

Nello specifico, come riportato nei Doc. Rif. [5], RFI stabilisce un valore soglia degli spostamenti residui attesi, corrispondenti ad uno Stato Limite di Esercizio ( $s_{SLE}$ ), pari a 5 cm. Inoltre, il cedimento residuo deve essere inferiore al 10% del cedimento di lungo termine;

Deve essere tenuto presente che le verifiche agli Stati Limite di Esercizio possono risultare più restrittive di quelle agli Stati Limite Ultimi.

### 5.3 STABILITÀ DEL SITO NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE

In base a quanto indicato nelle NTC 2018 il sito presso il quale è ubicata l'opera deve essere stabile nei confronti della liquefazione. Se il terreno risulta suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti appaiono tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorre procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili di liquefazione.

Le NTC2018 al paragrafo 7.11.3.4.2 stabiliscono che la verifica alla liquefazione può essere omessa quando si manifesti una delle seguenti circostanze:

- Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di campo libero (cfr.  $a_{max}$ ) minori di 0.1 g;
- Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
- Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N1)_{60} > 30$  oppure  $q_{c1N} > 180$  dove  $(N1)_{60}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche SPT normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e  $q_{c1N}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche CPT, normalizzata ad una tensione verticale efficace di 100 kPa;
- Distribuzione granulometrica esterna alle zone comprese tra le curve tipiche per materiali con coefficiente di uniformità  $U_c < 3.5$  e coefficiente di uniformità  $U_c > 3.5$ .

In caso contrario risulta necessario valutare il rischio di liquefazione e i potenziali effetti in superficie mediante procedimento descritto nel Doc. Rif. [1] basato su elaborazioni a partire dai risultati di prove CPT e SPT.

Per il tracciato oggetto del presente studio, le verifiche di liquefazione sono contenute nella Relazione geotecnica generale (Doc. Rif. [1]); in sintesi risulta che seppur presenti alcuni spessori di materiale suscettibile a liquefazione, per i quali i valori dei cedimenti post-sisma ottenuti e i valori degli LPI stimati

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>19 di 87</b>

risultano non nulli, i valori ottenuti di LPI sono da ritenersi trascurabili ai fini progettuali escludendo quindi il rischio di liquefazione nella tratta in esame.

#### 5.4 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI

##### 5.4.1 Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche

Le NTC 2018 (Doc. Rif. [3]) stabiliscono differenti Stati Limite (sia d'Esercizio che Ultimi) in funzione, in primo luogo, dell'importanza dell'opera mediante l'identificazione della Classe d'Uso e poi in funzione del danno conseguente ad un certo Stato Limite. In particolare, si definiscono i seguenti Stati Limite di Esercizio e Ultimi, come riportato al par. 3.2.1 del Doc. Rif. [3]:

- **Verifiche Stati Limite di Esercizio (SLE):**
  - Stato Limite di immediata Operatività **SLO** per le strutture ed apparecchiature che debbono restare operative a seguito dell'evento sismico. Tale stato limite non si applica per l'opera in oggetto.
  - Stato Limite di Danno **SLD** definito come lo stato limite da rispettare per garantire la sostanziale integrità dell'opera ed il suo immediato utilizzo.
- **Verifiche Stati Limite Ultimi (SLU):**
  - Stato Limite di Salvaguardia della Vita umana, **SLV**, definito come lo stato limite in cui la struttura subisce una significativa perdita della rigidezza nei confronti dei carichi orizzontali ma non nei confronti dei carichi verticali. Permane un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali.
  - Stato Limite di Prevenzione del Collasso, **SLC**, stato limite nel quale la struttura subisce gravi danni strutturali, mantenendo comunque un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza a collasso per carichi orizzontali.

La Tabella 5.6 riporta, in funzione della classe d'uso della struttura, lo stato limite da considerare in funzione della verifica di sicurezza appropriata per l'opera (Tabella C7.3.I del Doc. Rif. [4]).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA NM25	LOTTO 03 D 26	CODIFICA CL	DOCUMENTO R10000 001	REV. A

Tabella 5.6: Verifiche di sicurezza in funzione della Classe d'uso (Tab. C7.3.I, Doc. Rif. [4])

Stato Limite	Prestazione da verificare	Classe d'uso		
		I	II	III IV
SLO	Limitazione del danno degli elementi non strutturali o delle pareti delle costruzioni in muratura			X
	Funzionamento degli impianti			X
SLD	Controllo del danno degli elementi strutturali			X
	Controllo del danno degli elementi non strutturali o delle pareti delle costruzioni in muratura	X	X	
SLV	Livello di danno degli elementi strutturali coerente con il fattore di comportamento adottato, assenza di rotture fragili e meccanismi locali/globali instabili	X	X	X
	Assenza di crolli degli elementi non strutturali pericolosi per l'incolumità, pur in presenza di danni diffusi		X	X
	Capacità ultima degli impianti e dei collegamenti		X	X
SLC	Margine di sicurezza sufficiente per azioni verticali ed esiguo per azioni orizzontali		X	X
	Capacità di spostamento dei dispositivi nelle costruzioni con isolamento sismico		X	X

Con riferimento all'opera in oggetto, e considerando quanto riportato al punto C7.1 del Doc. Rif. [4], le verifiche geotecniche in presenza di un evento sismico richiedono la verifica ai seguenti stati limite:

- Stato Limite Ultimo: **SLV** – Stato Limite di Salvaguardia della Vita (cui corrisponde una probabilità di superamento  $P_{vr} = 10\%$  nel periodo  $V_r$ );
- Stato Limite Esercizio: **SLD** – Stato Limite di Danno (cui corrisponde una probabilità di superamento  $P_{vr} = 63\%$  nel periodo  $V_r$ ).

Le suddette probabilità, valutate nel periodo di riferimento  $V_r$  per l'azione sismica, consentono di determinare, per ciascuno stato limite, il tempo di ritorno del terremoto di progetto corrispondente.

#### 5.4.2 Verifiche Stati limite ultimi (SLU)

Per tutte le verifiche l'azione sismica di progetto deve essere valutata sulla base degli Stati Limite relativi all'opera da verificare (vedasi Doc. Rif. [3]). Per l'opera 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 almeno le medesime verifiche definite in campo statico. In particolare, la stabilità globale in condizioni sismiche delle opere in materiali

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b></p> <p><b>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>					
<p><b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b></p>	<p>COMMESSA NM25</p>	<p>LOTTO 03 D 26</p>	<p>CODIFICA CL</p>	<p>DOCUMENTO RI0000 001</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 21 di 87</p>

sciolti, quali rilevati, deve essere svolta impiegando lo stesso approccio di cui al par 6.8.2 del Doc. Rif. [3], , 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. Rif. [3]).

Le condizioni di stabilità del rilevato devono essere verificate affinché prima, durante e dopo il sisma la resistenza del sistema sia superiore alle azioni, ovvero gli spostamenti permanenti indotti dal sisma siano di entità tale da non pregiudicare le condizioni di sicurezza o di funzionalità delle strutture o infrastrutture medesime.

Come riportato al Par. 7.11.4 del Doc. Rif. [3] le verifiche possono essere condotte mediante metodi pseudo statici, metodi degli spostamenti e metodi di analisi dinamica.

#### **5.4.3 Stati limite di esercizio (SLE)**

Deve essere verificato, mediante analisi effettuate impiegando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici dei materiali, che gli spostamenti permanenti indotti dal sisma non alterino significativamente la resistenza della fondazione e devono essere compatibili con la funzionalità dell'opera.

L'azione sismica di progetto deve essere valutata sulla base degli Stati Limite relativi all'opera da verificare come definito nelle istruzioni per l'applicazione delle NTC2018. Per l'opera in oggetto, le verifiche agli Stati Limite di Esercizio verranno condotte con riferimento allo Stato Limite di Danno (**SLD**).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE</b> <b>FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>22 di 87</b>

## 6. COEFFICIENTI SISMICI PER LE VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE

Come descritto al Par. C7.11.4 del Doc. Rif. [4] , la verifica di stabilità globale in condizioni sismiche va condotta, in accordo a quanto riportato nel par.7.11.3.5.2 delle NTC2018 (Doc. Rif. [3]), mediante analisi pseudo-statiche adottando i coefficienti sismici  $k_H$  (orizzontale) e  $k_V$  (verticale), definiti come segue:

$$k_H = \beta_s \cdot a_{max}/g$$

$$k_V = \pm 0.5 \cdot k_H$$

essendo:

$a_{max}$  = accelerazione sismica di progetto definita nella Relazione geotecnica generale (Doc. Rif. [1]), qui assunto pari a 0.137 (valore massimo per la tratta in oggetto).

$\beta_s$  = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito. Come chiarito al Par. 7.11.4 del Doc. Rif. [3] il valore del coefficiente  $\beta_s$  da assumere per verifiche allo SLV su fronti di scavo o rilevati, è pari a  $\beta_s = 0.38$ .

In accordo alle espressioni di cui sopra, si ottengono i seguenti coefficienti per la verifica di stabilità globale allo SLV (Tabella 6.1):

**Tabella 6.1: Valori dei coefficienti sismici per le verifiche di stabilità globale**

$a_{max}$ (g)	$k_H$	$k_V$
0.137	0.052	$\pm 0.026$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE</b> <b>FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>23 di 87</b>

## 7. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA

### 7.1 CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI

#### 7.1.1 *Slope/W*

Slope/W è un codice di calcolo dedicato allo studio della stabilità dei pendii che permette di calcolare il fattore di sicurezza dei pendii in terreno e in roccia.

Il codice Slope/W utilizza il metodo dell'equilibrio limite e permette di prendere in considerazione superfici di scorrimento definite in diversi modi, condizioni stratigrafiche e idro-stratigrafiche complesse mediante l'utilizzo di diversi modelli costitutivi per i materiali e condizioni di pressioni neutre variabili. Sono inoltre utilizzabili diversi metodi di analisi e possono essere applicate condizioni di carico di vario tipo.

La versione del software adottata per le verifiche condotte nel presente documento è Slope/W – GeoSlope ver. 7.17 - GEOSTUDIO 2007.

#### 7.1.2 *Plaxis 2D*

Plaxis 2D è un codice di calcolo agli elementi finiti (sviluppato dalla Delft University of Technology) bidimensionale in grado di tenere conto del comportamento del terreno seguendo la variazione dello stato tensionale e deformativo nei vari punti dell'ammasso considerato e negli eventuali elementi strutturali collegati con i quali interagisce.

È utilizzabile per eseguire analisi di stabilità e di deformazione nell'ambito di molteplici applicazioni geotecniche. Il programma permette di simulare situazioni reali riconducibili a condizioni di deformazione piane (plane strain) o a condizioni assialsimmetriche (axisymmetric).

Plaxis consente di svolgere diversi tipi di calcolo agli elementi finiti distinguendo tra calcoli di tipo plastico (plastic), analisi di consolidazione (consolidation), analisi di stabilità con il metodo della riduzione dei parametri di resistenza (phi-c reduction) e analisi dinamiche (dynamic).

La versione del software adottata per le analisi condotte nel presente documento è Plaxis 2D AE.02.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE</b> <b>FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>24 di 87</b>

## 7.2 METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE

### 7.2.1 Verifiche di stabilità

Le verifiche di stabilità dei rilevati (Verifiche SLU) sono state condotte 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:

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

Il codice Slope/W è stato utilizzato nel presente documento per condurre le analisi di stabilità sia in campo statico che in campo sismico, adottando il metodo pseudo-statico, costituenti le verifiche SLU richieste dalla Normativa per le opere in terreni sciolti.

### 7.2.2 Valutazione degli spostamenti

Il codice Plaxis 2D è stato utilizzato nel presente documento per condurre le analisi di spostamento in campo statico costituenti le verifiche SLE richieste dalla Normativa per le opere in terreni sciolti.

Il calcolo dei cedimenti attraverso il codice Plaxis 2D è stato condotto utilizzando un modello costitutivo di tipo elasto-plastico con criterio di rottura alla Mohr Coulomb per le formazioni ghiaioso-sabbiose e un modello costitutivo tipo Cam Clay (Soft Soil Model) per le formazioni definite come coesive. I parametri geotecnici adottati nel calcolo sono quelli riportati al paragrafo relativo.

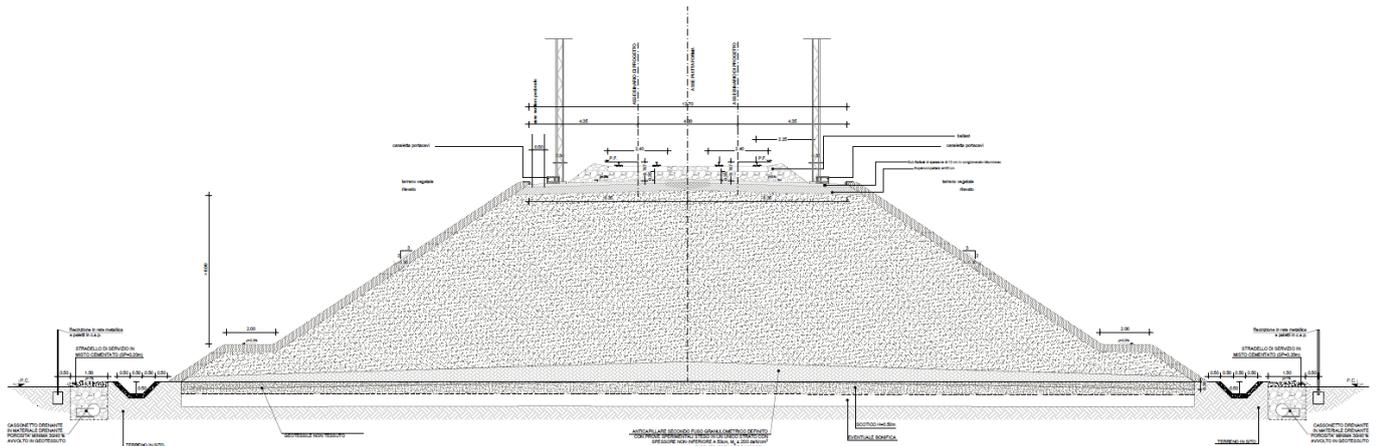
Attraverso questo calcolo è stato possibile ripercorrere la storia tenso-deformativa del sistema rilevato esistente-terreno di fondazione e valutare lo sviluppo nel tempo dei cedimenti di consolidazione primaria dovuti alla costruzione dei nuovi rilevati e alla successiva applicazione dei sovraccarichi dovuti al traffico ferroviario.

Le condizioni al contorno idrauliche per i modelli di calcolo adottato per tutte le analisi prevedono che i limiti del modello siano drenati lungo i bordi verticali e lungo il bordo orizzontale.

## 8. CARATTERISTICHE DEL CORPO FERROVIARIO

### 8.1 GEOMETRIA DEI 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. Dove necessario, ovvero dove le verifiche effettuate non vengono soddisfatte, al di sotto del rilevato è stato previsto anche uno strato di bonifica di spessore definito a seguito delle verifiche effettuate. In Figura 8.1 si riporta una sezione tipologica del rilevato ferroviario.



**Figura 8.1: - Stralcio di sezione tipologica rilevato ferroviario**

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 supercompattato 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.

Nelle analisi, la finitura a verde non è stata modellata con parametri geotecnici differenti dal materiale di rilevato; in realtà tale finitura darà necessariamente un contributo in termini di coesione efficace allo strato più superficiale delle scarpate. Per tenerne in conto, nelle verifiche di stabilità sono state escluse dalla verifica le superfici di scivolamento corticali.

## 8.2 GEOMETRIA DELLE TRINCEE FERROVIARIE

Le scarpate delle trincee sono generalmente previste con pendenza 3H:2V.

La sede ferroviaria è finita 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. Una volta completato il pacchetto di fondazione della pavimentazione, si posizioneranno ballast, traversine ed armamento ferroviario.

## 8.3 MATERIALI E PARAMETRI GEOTECNICI

Il materiale costituente il corpo del rilevato sarà materiale a grana grossa con i valori minimi dei parametri caratteristici riportati in Tabella 8.1.

Come anticipato nei paragrafi precedenti, l'inerbimento superficiale, ma anche lo strato di super compattato ed il sub-ballast sono stati modellati con lo stesso materiale costituente il rilevato. Il ballast, le traversine e l'armamento sono stati modellati come sovraccarichi permanenti (si veda paragrafo 8.4).

**Tabella 8.1: Parametri geotecnici di calcolo – materiali costituenti il rilevato**

STRATO	Spessore	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Modulo di Young operativo	Permeabilità
	[m]	$\gamma_d$	$\phi'_k$	$\phi'_d$ M2	$c'_k$	$c'_d$ M2	$E_{op.}$	k.
		[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[m/s]
RILEVATO	Variabile	20	38	32	0	0	40	1x10 <sup>-5</sup>
STRATO DI SCOTICO	0.5	20	38	32	0	0	20	1x10 <sup>-5</sup>
EVENTUALE STRATO DI BONIFICA	Variabile	20	38	32	0	0	20	1x10 <sup>-5</sup>

## 8.4 CARICHI DI PROGETTO

I carichi di progetto considerati nelle analisi oggetto del presente documento sono i seguenti:

- Carico rappresentativo del pacchetto di armamento ferroviario (ballast, traversine, rotaie).
- Carico rappresentativo del traffico ferroviario.
- Carico da azione sismica.

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>27 di 87</b>

L'armamento ferroviario è stato schematizzato, in accordo a quanto riportato al par 5.2.2.1. del Doc. Rif. [3] e nel Doc. Rif. [5], 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 kN/m<sup>3</sup>. Il carico è stato applicato sulla sommità del rilevato per una larghezza complessiva di circa 10 m.

Per la definizione del sovraccarico da traffico ferroviario si sono valutate le pressioni equivalenti dovute sia al treno per traffico normale LM71 sia per quello da traffico pesante SW/2, secondo quanto definito sia dalle NTC2018 (punti 5.2.2.2.1.1 e 5.2.2.2.1.2. del Doc.Rif.[3]) sia dal "MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI" (RFI DTC SI MA IFS 001 C del 21.12.2018 , Doc.Rif.[5]).

In particolare, assumendo per il sovraccarico da traffico ferroviario il modello di carico LM71 (traffico normale). In base a quanto indicato nella specifica di riferimento si è definita la pressione equivalente secondo le seguenti considerazioni:

- il carico dato dal treno LM71 risulta essere pari a 250 kN ad asse, con interasse pari a 1.6 m, (ossia  $250/1.6 = 156.25$  kN/m);
- per riportare il carico ferroviario dalla traversina, di larghezza pari a 2.4 m, al piano al di sotto dell'armamento si è considerata una diffusione con pendenza 1:4. Pertanto, la pressione equivalente è stata valutata come applicata su una fascia di larghezza pari a 3 m, centrata in corrispondenza dell'asse della linea ferroviaria (ossia  $156.25/3 = 52.08$  kPa). In caso di doppio binario si sono considerate due fasce di larghezza pari a 3 m in corrispondenza delle due vie di corsa.

Mentre, assumendo per il sovraccarico da traffico ferroviario il modello di carico SW/2 (traffico pesante), si è definita la pressione equivalente secondo le seguenti considerazioni:

- il carico dato dal treno SW/2 risulta essere pari a 150 kN/m;
- in modo analogo a quanto detto sopra per riportare il carico ferroviario dalla traversina, di larghezza pari a 2.4 m, al piano al di sotto dell'armamento si è considerata una diffusione con pendenza 1:4. Pertanto, la pressione equivalente è pari a  $150/3 = 50$  kPa da amplificarsi, con un coefficiente a pari a 1. Il valore di pressione risultante è quindi pari a 50 kPa. In caso di doppio binario si considerano due fasce di larghezza pari a 3 m in corrispondenza delle due vie di corsa.

Alla luce di quanto sopra, si è deciso conservativamente di svolgere le verifiche considerando il carico da treno tipo LM71.

Per il tipo di traffico caratterizzante la linea, sulla base di quanto indicato nel Doc.Rif.[10], si è assunto un coefficiente di amplificazione  $\alpha$  pari a 1. Pertanto, il valore di pressione risultante è pari a 52.08 kPa.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>28 di 87</b>

Per la definizione dell'azione sismica di progetto si rimanda al capitolo 6 del presente documento.

Tali carichi e sovraccarichi sono stati inseriti nelle diverse verifiche agli SLU (statiche e sismiche) e agli SLE applicando laddove necessario gli opportuni coefficienti parziali di amplificazione e di combinazione come previsti dalla Normativa vigente. Nei successivi paragrafi, i carichi ferroviari applicati nelle diverse verifiche in accordo a quanto previsto dalla Normativa vigente sono riportati nel dettaglio.

#### **8.4.1 Carichi ferroviari per le Verifiche SLU**

Nelle verifiche di stabilità in condizioni statiche delle sezioni in rilevato sono stati applicati i seguenti carichi:

- Il carico del pacchetto di armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14.4 kPa su una lunghezza di 10m. Tale carico è di tipo permanente sfavorevole pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 5.1, il valore di calcolo assunto è pari a:

$$q_d = q_k \times \gamma_{Gi [A2]} = 14.4 \text{ kPa} \times 1.3 = 18.7 \text{ kPa}$$

- Il carico da traffico ferroviario (q), assunto pari a 52.08 kPa, è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita applicata in corrispondenza delle impronte delle traversine ferroviarie. Tale sovraccarico è di tipo variabile/sfavorevole pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 5.1; il valore di calcolo è stato assunto pari a:

$$q_d = q_k \times \gamma_{Qi [A2]} = 52.1 \text{ kPa} \times 1.3 = 67.7 \text{ kPa}.$$

Nelle verifiche di stabilità in condizioni sismiche delle sezioni in rilevato sono stati applicati i seguenti carichi:

- Il carico del pacchetto di armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14.4 kPa su una lunghezza di 10m. Tale carico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico in accordo a quanto specificato dalle NTC 2018 (si veda Par.7.11.1 del Doc. Rif. [3]) che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:

$$q_d = q_k = 14.4 \text{ kPa}.$$

- Il carico da traffico ferroviario (q), assunto pari a 52.08 kPa, è moltiplicato per un coefficiente  $\psi=0.2$  in accordo a Doc. Rif. [3] ed è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita applicata in corrispondenza delle impronte delle traversine ferroviarie. Tale sovraccarico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico in accordo a quanto specificato dalle NTC 2018 (vedasi

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>29 di 87</b>

Par.7.11.1 del Doc. Rif. [3]) che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:

$$q_d = 0.2q_k = 10.4 \text{ kPa.}$$

Per le verifiche di stabilità in condizioni statiche e sismiche condotte sulle sezioni in trincea:

- il carico dell'armamento ferroviario è stato conservativamente trascurato in quanto fornisce un contributo alla stabilità della scarpata;
- Il carico da traffico ferroviario è stato conservativamente e in accordo alla normativa, considerato nullo.

#### **8.4.2 Carichi ferroviari per le Verifiche SLE**

Nel calcolo dei cedimenti sono stati considerati i seguenti carichi

- Il carico del pacchetto di armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14.4 kPa su una lunghezza di 10m. Tale carico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico in accordo a quanto specificato dalle NTC 2018, pertanto:

$$q_d = q_k = 14.4 \text{ kPa.}$$

- viene omesso nell'analisi il sovraccarico da traffico ferroviario in accordo a quanto specificato in Doc. Rif. [5].

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>30 di 87</b>

## 9. SELEZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO

Oggetto della presente relazione sono i rilevati e le trincee lungo il lotto funzionale denominato Lotto 3 del progetto di raddoppio ferroviario Codogno – Cremona – Mantova, il quale comprende la tratta tra le stazioni di Piadena (km 55+286 LS) e Mantova (km 89+557 LS). La sede ferroviaria si sviluppa in rilevato per gran parte del progetto, con altezza massima di 10m circa, mentre le tratte in trincea sono caratterizzate da uno scavo massimo di 3.5m circa.

Ai fini delle verifiche sono state selezionate le seguenti sezioni significative:

- Sezione al km 57+600 in rilevato che rappresenta la condizione più critica di rilevato in affiancamento, dove la costruzione del raddoppio ferroviario avviene mantenendo l'esercizio. Il nuovo rilevato ha un'altezza pari a 2.4m circa,
- Sezione al km 58+075 in corrispondenza del rilevato di approccio al ponte VI01 sul canale Dugale. Il rilevato ha un'altezza pari a circa 4.0m. Il rilevato di progetto è costruito in variante rispetto alla linea esistente che mantiene l'esercizio ma è posta ad una distanza oltre i 100m dal rilevato in costruzione.
- Sezione al km 67+150 in corrispondenza del rilevato di approccio al viadotto sul fiume Oglio VI02. Il rilevato ha un'altezza pari a circa 11.0 m e corrisponde alla massima altezza raggiunta lungo la tratta considerata. Il rilevato di progetto è costruito in affiancamento alla linea esistente con interruzione dell'esercizio ferroviario.
- Sezione al km 63+250, che rappresenta la condizione più critica in trincea. La trincea ha una profondità pari a circa 3.2m e risulta essere quella con profondità maggiore nell'intera tratta in esame. La trincea è un allargamento di quella della linea esistente.

Per le sezioni sopra selezionate sono state svolte le verifiche di stabilità globale e le verifiche dei cedimenti, eccezione fatta per la sezione in trincea per cui è stata effettuata la sola verifica di stabilità globale della scarpata.

Nel seguito sono riportate le verifiche relative alle sezioni individuate per la quale è stata definita la stratigrafia di riferimento ed i relativi parametri geotecnici di progetto in accordo a quanto riportato nella Relazione Geotecnica generale (Doc. Rif. [1]).

## 10. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 57+600

### 10.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

In accordo a quanto riportato nella Relazione Geotecnica generale (Doc. Rif. [1]) e sulla base di quanto descritto nel capitolo 5., nella Tabella 10.1 e Tabella 10.2 sono riportati la stratigrafia ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto, fattorizzati utilizzando i coefficienti M2 riportati nella Tabella 5.4 della presente relazione.

Si rimanda invece alla Tabella 8.1 per i valori dei parametri geotecnici relativi ai materiali antropici utilizzati per il corpo del rilevato e per lo strato di scotico (50 cm al di sotto del rilevato).

Si ricorda che, come definito al capitolo. 7 del Doc. Rif. [3], le verifiche geotecniche SLU di stabilità globale dei rilevati, in campo statico, richiedono l'adozione della sola Combinazione 2 dell'Approccio 1 e pertanto l'applicazione dei soli coefficienti parziali M2, mentre per le verifiche sismiche e per le verifiche SLE, finalizzate alla determinazione dei cedimenti, sono richiesti i parametri caratteristici.

**Tabella 10.1: Stratigrafia di calcolo per la sezione al km 57+600**

Strato	Profondità da [m da p.c.]	Profondità a [m da p.c.]	Descrizione
Wa1	0	5	Limo argilloso o con argilla, debolmente sabbioso o sabbioso e/o argilla limosa.
WRa2	5	8	Argilla limosa sabbiosa e/o limo argilloso sabbioso e/o argilla con sabbia con possibili livelli centimetrici di presenza organica.
WRs2	8	11.5	Sabbia limosa, da debolmente argillosa ad argillosa.
WRa2	11.5	14	Argilla limosa sabbiosa e/o limo argilloso sabbioso e/o argilla con sabbia con possibili livelli centimetrici di presenza organica.
Rs1	14	17	Sabbia da debolmente limosa a limosa, localmente debolmente argillosa e/o limo sabbioso.
RMa	17	50	Limo argilloso sabbioso e/o argilla limosa sabbiosa con frequenti intercalazioni di livelli sabbiosi. Possibili livelli centimetrici di materia organica e/o torba.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA NM25	LOTTO 03 D 26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A

Tabella 10.2: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione al km 57+600 – Materiali in sito

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Resistenza al taglio non drenata		Modulo di Young operativo	Rapporto di Compressione e Ricompressione		Rapporto di Sovraconsolidazione	Permeabilità
	$\gamma_d$	$\phi'_k$	$\phi'_d$	$c'_k$	$c'_d$	$c_u$	$c_u$	$E_{op.}$	CR	RR	OCR	k
	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[m/s]
Wa1	19	25	20.5	0	0	80	57.1	-	0,18	0,036	3	5.0E-08
WRa2	19	25	20,5	0	0	40 fino a 8 m da pc; 50 oltre 8 m da pc.	28.6 fino a 8m da pc; 35.7 oltre 8 m da pc	-	0,16	0,032	2	1.0E-08
WRs2	19	33	27.5	0	0	0	0	20	-	-	-	5.0E-07
Rs1	19	33	27.5	0	0	0	0	21.25	-	-	-	5.0E-07
RMa	19	25	20.5	0	0	-	-	22.5	-	-	1	1.0E-08

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli ad una profondità di circa 4.0 m dal piano campagna.

## 10.2 CARICHI DI PROGETTO

Per il dettaglio dei carichi di progetto del pacchetto di armamento ferroviario e del carico da traffico assunti per le verifiche SLU e per le verifiche SLE si faccia riferimento a quanto riportato nel paragrafo 8.4.2.

Nelle verifiche SLU in condizioni sismiche, in accordo a quanto riportato nel capitolo 6, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$$K_H = + 0.052 \quad (\text{concorde alla direzione di scivolamento})$$

$$K_V = \pm 0.026 \quad (\text{verificando la più cautelativa tra negativo e positivo})$$

La condizione più cautelativa risulta essere rappresentata da  $K_V = -0.026$ .

## 10.3 VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE

Le verifiche SLU della stabilità globale del rilevato (sia in condizioni statiche che sismiche) sono state condotte tramite il codice di calcolo Slope/W (Doc. Rif. [13]). Le combinazioni di carico adottate nelle analisi fanno riferimento rispettivamente ai coefficienti parziali (A2+M2) per le analisi in campo statico e ai valori caratteristici per le analisi sismiche.

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>33 di 87</b>

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico ferroviario. Tra esse, è definita critica quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo. Come da NTC 2018, la verifica SLU di stabilità globale risulta soddisfatta quando la superficie di scivolamento più critica, tra tutte quelle cinematicamente possibili, ha un fattore di sicurezza pari almeno ad 1.1 in condizioni statiche e pari almeno a 1.2 in condizioni sismiche, ossia risultino soddisfatte le seguenti disuguaglianze:

- analisi statica:  $R/E_d \geq \gamma_R$  con  $\gamma_R=1.1$
- analisi sismica:  $R/E_d \geq \gamma_R$  con  $\gamma_R=1.2$

essendo:

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

$R_d$  =  $R/\gamma_R$  valore di progetto della resistenza.

Nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore minore di 1 metro, considerate corticali e non rappresentative della situazione reale in quanto la scarpata verrà rifinita con la copertura a verde.

### 10.3.1 Risultati

I risultati ottenuti nelle analisi di stabilità globale sono riportati in Tabella 10.3 insieme alle figure di riferimento

**Tabella 10.3: Risultati verifiche di stabilità globale per la sezione al km 57+600**

ANALISI	$R/E_d$	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA	1.356	Figura 10.1
PSEUDOSTATICA	1.500	Figura 10.2

Le verifiche di stabilità globale in campo statico e sismico risultano soddisfatte.

**ANALISI STATICA**

Sezione Affiancamento km 57+600.

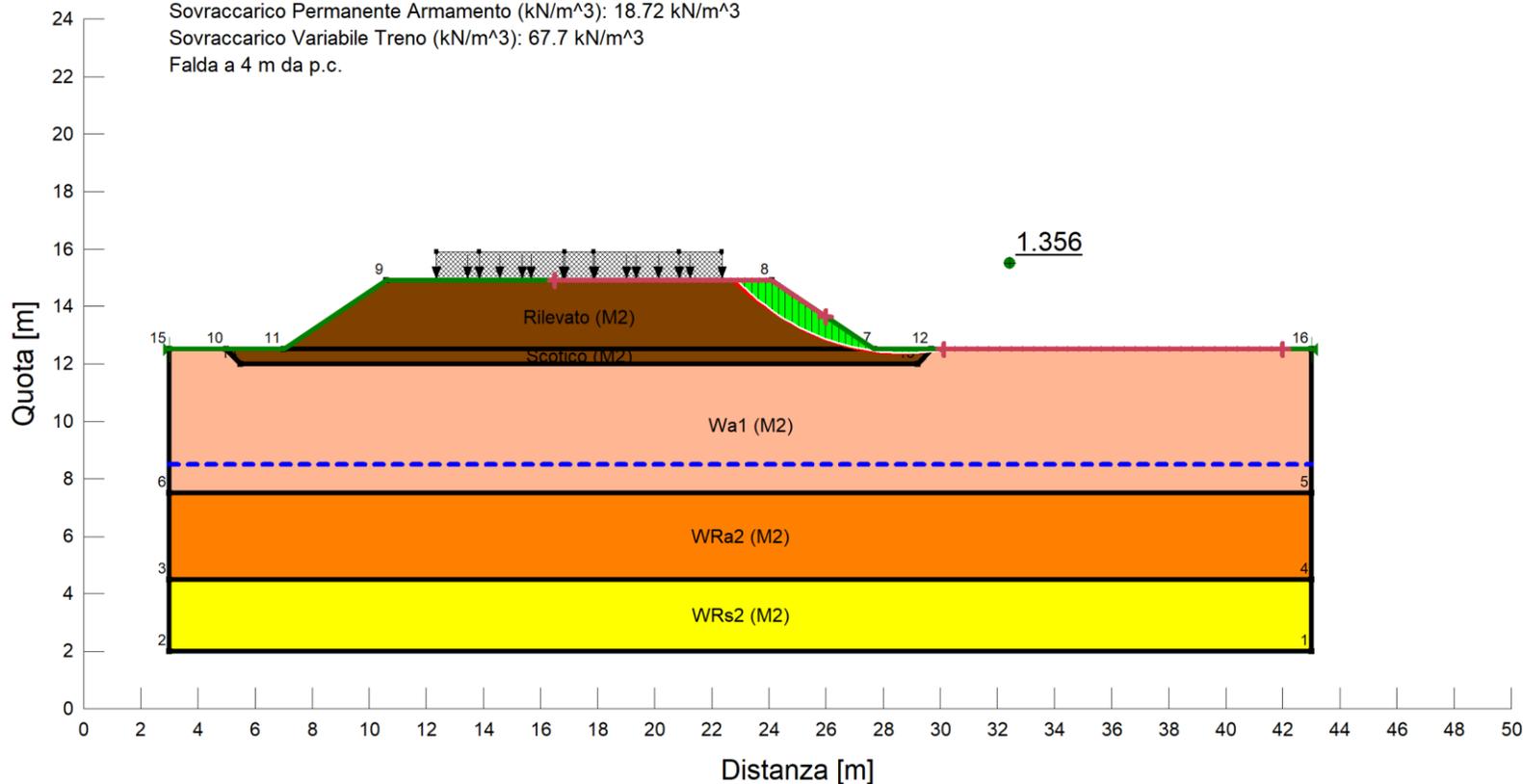
kh: 0

kv: 0

Sovraccarico Permanente Armamento (kN/m<sup>3</sup>): 18.72 kN/m<sup>3</sup>

Sovraccarico Variabile Treno (kN/m<sup>3</sup>): 67.7 kN/m<sup>3</sup>

Falda a 4 m da p.c.



Name: Rilevato (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 32.01 °

Name: Scotico (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 32.01 °

Name: Wa1 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 20.46 °

Name: WRa2 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 20.46 °

Name: WRs2 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 27.45 °

**Figura 10.1: Rilevato H=2.40 m, sez.57+600 - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2**

**ANALISI PSEUDOSTATICA**

Sezione Affiancamento km 57+600.

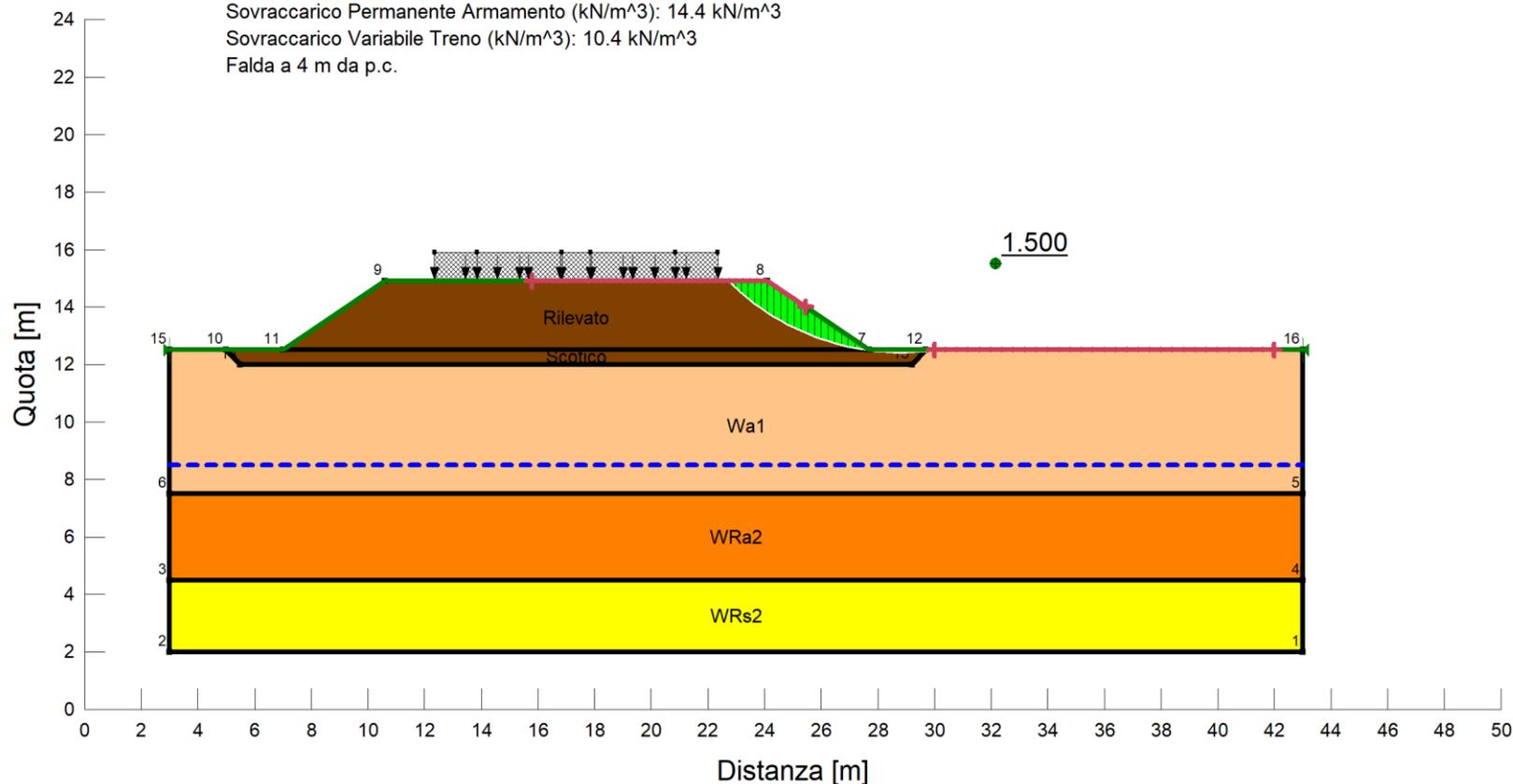
kh: 0.052

kv: -0.026

Sovraccarico Permanente Armamento (kN/m<sup>3</sup>): 14.4 kN/m<sup>3</sup>

Sovraccarico Variabile Treno (kN/m<sup>3</sup>): 10.4 kN/m<sup>3</sup>

Falda a 4 m da p.c.



Name: Rilevato  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 38 °

Name: Scotico  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 38 °

Name: Wa1  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 25 °

Name: WRa2  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 25 °

Name: WRs2  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °

**Figura 10.2: Rilevato H=2.40 m, sez. 57+600 - Analisi di stabilità globale in campo sismico**

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA NM25	LOTTO 03 D 26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A	FOGLIO 36 di 87

## 10.4 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

### 10.4.1 Modelli e fasi di calcolo

La sezione in esame, alla progressiva 57+600, fa riferimento alla condizione più critica di rilevato in affiancamento, pertanto le analisi saranno finalizzate al calcolo dei cedimenti indotti sulla linea in esercizio.

L'altezza del rilevato in progetto è pari a circa 2.4 metri escluso il pacchetto di armamento ferroviario (ballast, traversine e rotaie), modellato nelle analisi come sovraccarico distribuito.

La stratigrafia di calcolo utilizzata ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici sono riportati in Tabella 10.1 e Tabella 10.2.

Si tratta di modelli bi-dimensionali in cui è mostrato il rilevato in sezione, con la propria geometria ed i sovraccarichi.

Per definire l'andamento dei cedimenti nel tempo viene omesso nell'analisi il sovraccarico da traffico ferroviario in accordo a quanto specificato in Doc. Rif. [5].

Al fine di rendere maggiormente chiare le fasi di costruzioni del rilevato ed i risultati delle analisi fatte, si in Figura 10.3 è riportato uno schema rappresentativo del modello considerato.

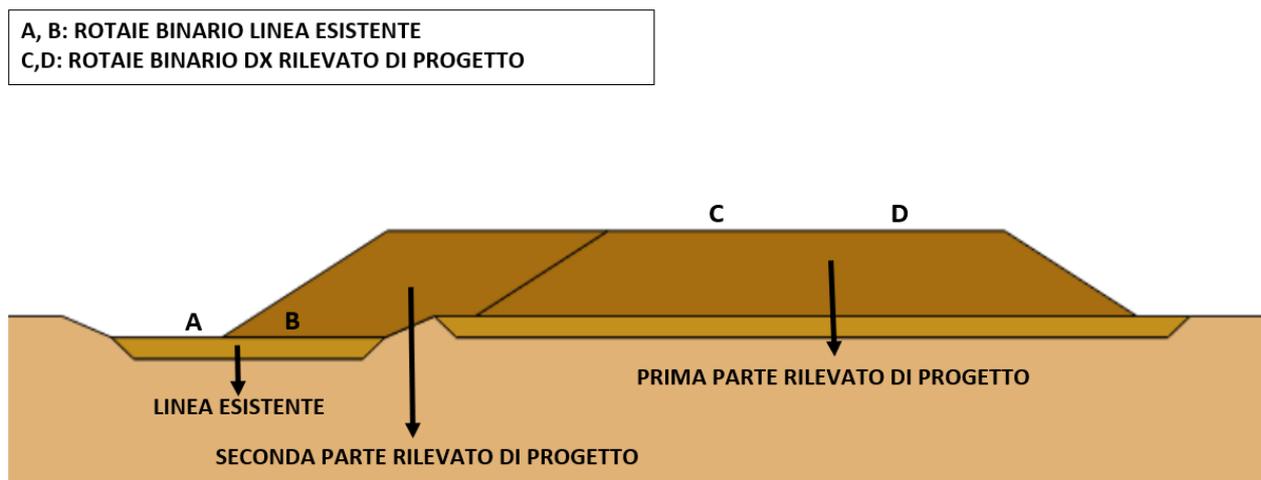


Figura 10.3: Schema rappresentativo sezione km 57+600

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- Generazione dello stato tensionale iniziale geostatico;
- Costruzione della trincea esistente per una durata di 6 mesi;
- Costruzione dell'armamento ferroviario sulla trincea esistente per una durata di 30 giorni;
- Consolidazione della linea esistente per una durata di 50 anni;
- Azzeramento dei cedimenti dovuti alla linea esistente e costruzione della prima parte del rilevato di progetto per una durata di 6 mesi;
- Costruzione dell'armamento ferroviario sulla prima parte del rilevato di progetto per una durata di 30 giorni e successiva consolidazione di 11 mesi fino alla messa in opera;
- Costruzione della seconda parte del rilevato di progetto per una durata di 6 mesi;
- Costruzione dell'armamento ferroviario sulla seconda parte del rilevato di progetto per una durata di 30 giorni e successiva consolidazione di 11 mesi fino alla messa in opera dell'intero rilevato;
- Consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio della linea ferroviaria per una durata di 6 mesi, 1 anno, 3 anni, 20 anni e 75 anni.

La mesh di calcolo utilizzata per le analisi è mostrata nella Figura 10.4.

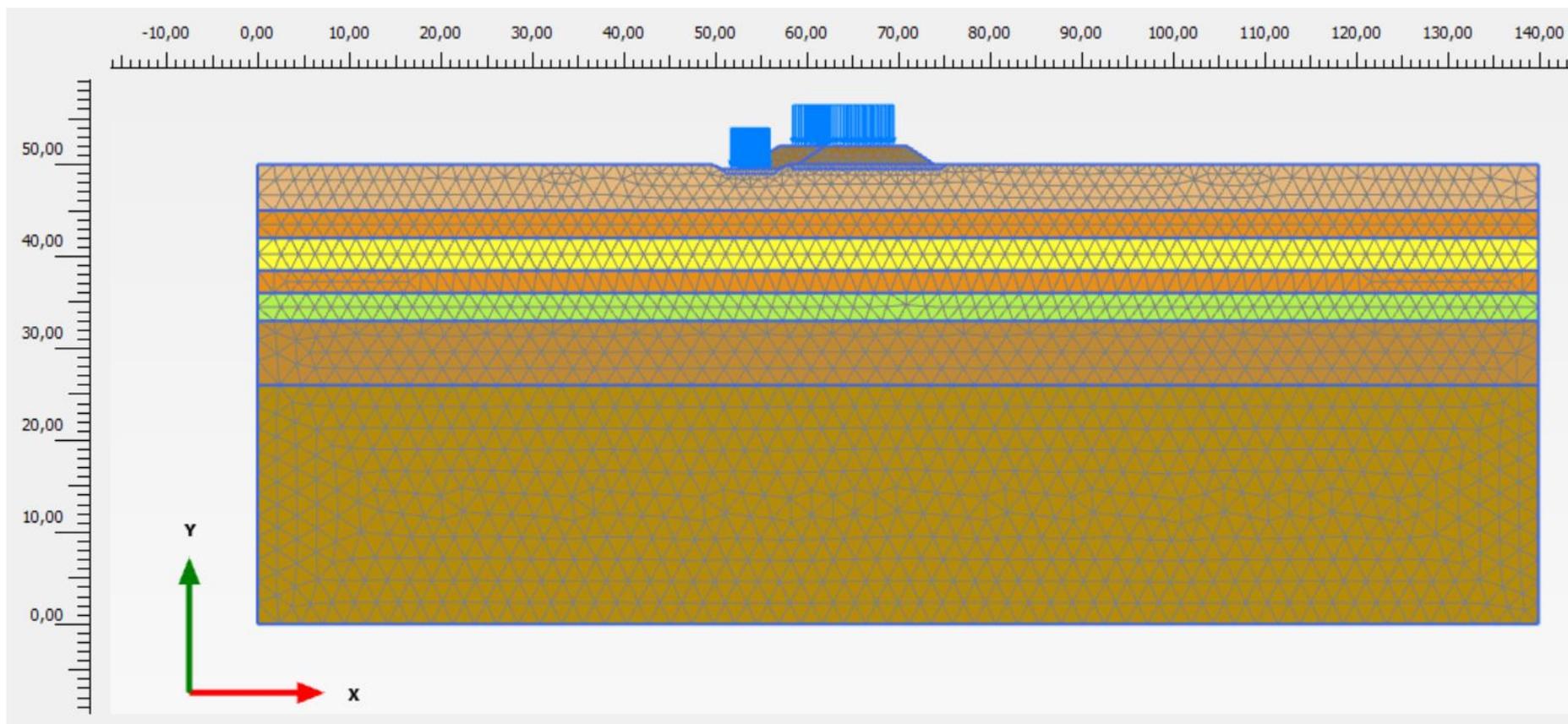


Figura 10.4: Modello rilevato Sez. 57+600

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE</b> <b>FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>

#### 10.4.2 Risultati

Con riferimento al Manuale di Progettazione RFI DINIC MA CS 00 001 C (parte IV) (Doc. Rif. [5]), è necessario garantire il rispetto dei seguenti criteri di ammissibilità:

- cedimento residuo (differenza tra cedimento di lungo termine e cedimento a fine costruzione rilevato) inferiore a 5cm;
- cedimento residuo inferiore al 10% del cedimento di lungo termine;
- il cedimento differenziale fra le due rotaie del binario (livello trasversale) deve rispettare le limitazioni imposte dal documento “Standard di qualità geometrica del binario” con velocità fino a 300 km/h (Cod. RFI TCAR ST AR 01 001 D) e suoi allegati (Doc. Rif. [5]).

In Figura 10.5 è riportato lo spostamento verticale  $u_y$  in corrispondenza della base del rilevato al termine delle seguenti fasi di calcolo:

- a termine di tutte le fasi di costruzione del rilevato e messa in opera;
- dopo 6 mesi dall’entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 1 anno dall’entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 3 anni dall’entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 10 anni dall’entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 20 anni dall’entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 75 anni dall’entrata in esercizio della linea ferroviaria.

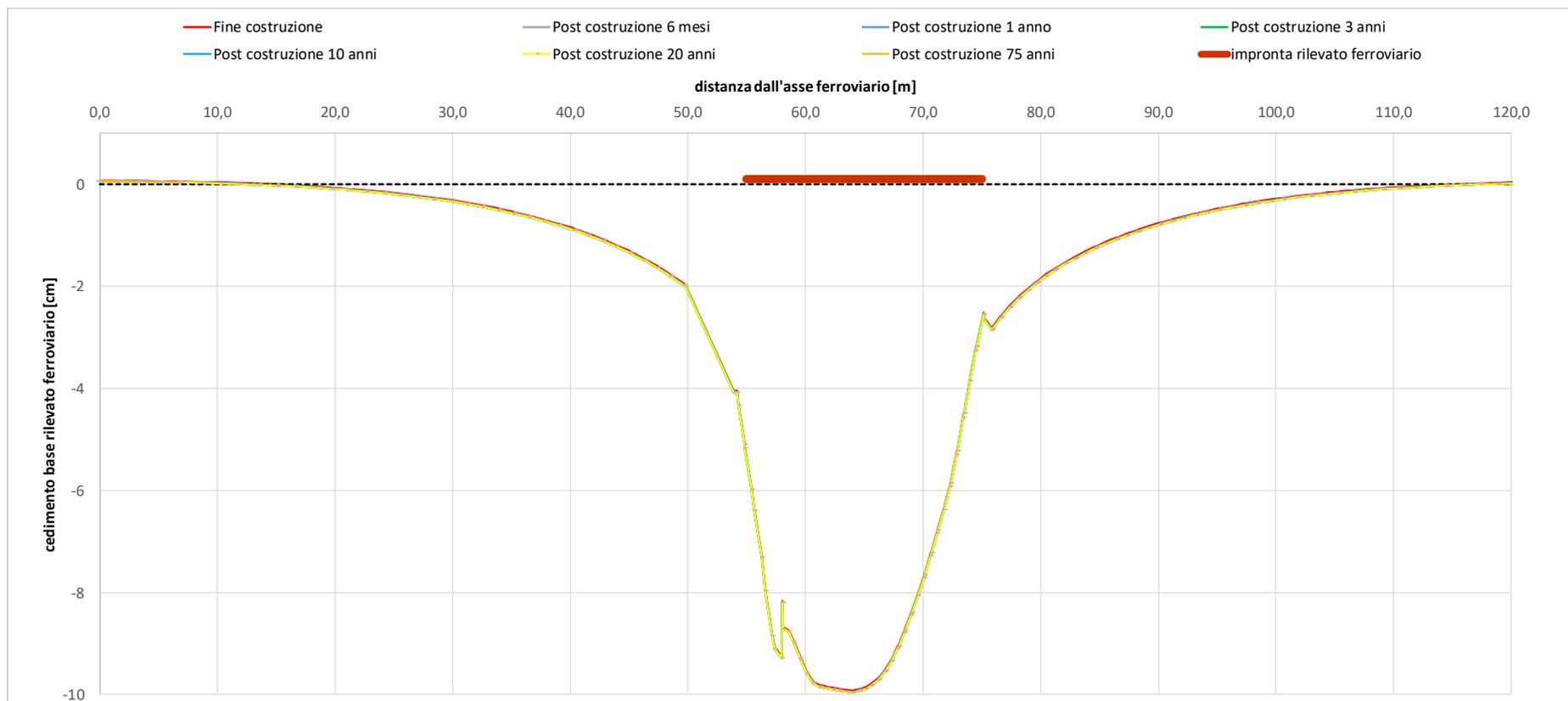
Come mostrato in Figura 10.5, dopo 6 mesi dal termine della messa in opera il cedimento è prossimo al cedimento a lungo termine (75 anni), stato in cui c’è totale dissipazione delle sovrappressioni interstiziali indotte dal carico (si vedano Figura 10.8 e Figura 10.9). I primi due criteri di ammissibilità risultano pertanto soddisfatti.

In Figura 10.10 si riporta l’andamento del cedimento differenziale nel tempo (livello trasversale) tra le rotaie dei due binari in esercizio (si veda anche lo schema di Figura 10.3). Si osserva quanto segue:

- il livello trasversale massimo del binario A-B della linea esistente è pari a circa  $XL=4.7$  mm;
- il livello trasversale massimo del binario C-D è pari a circa  $XL=8.1$  mm.

Come riportato nella sezione III del Doc. Rif. [5], al livello trasversale è associato un livello di qualità per la pianificazione dei lavori di manutenzione. Sia al binario A-B che al binario C-D risulta essere associato il

primo livello di qualità, che comprende cedimenti longitudinali fino a 10 mm. In entrambe i casi sarà quindi consentito l'esercizio ferroviario senza alcun tipo di restrizione.



**Figura 10.5: Rilevato sez. 57+600 – Spostamenti verticali in corrispondenza della base del rilevato ferroviario**

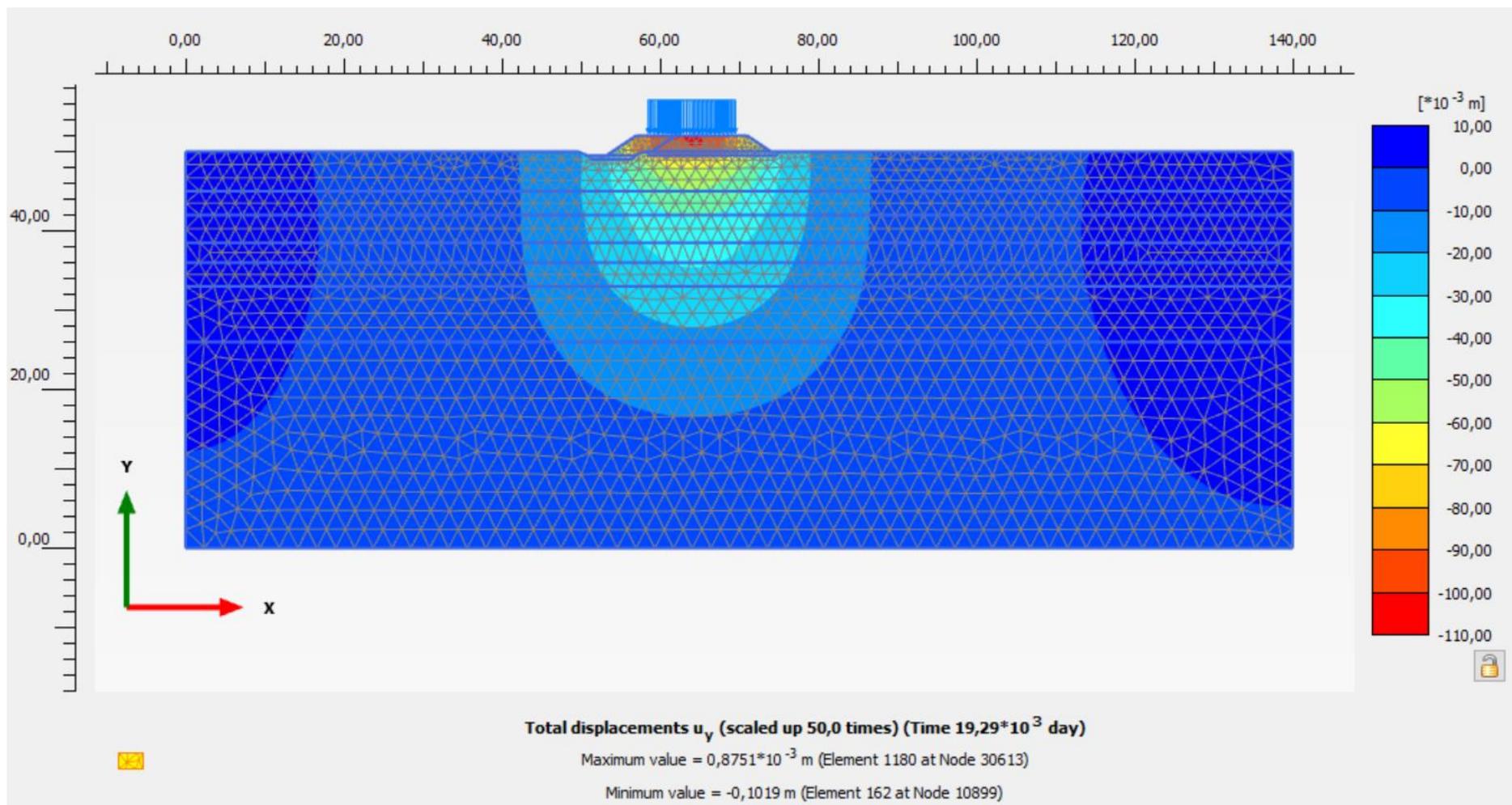


Figura 10.6: Rilevato sez. 57+600 – Spostamenti verticali termine costruzione

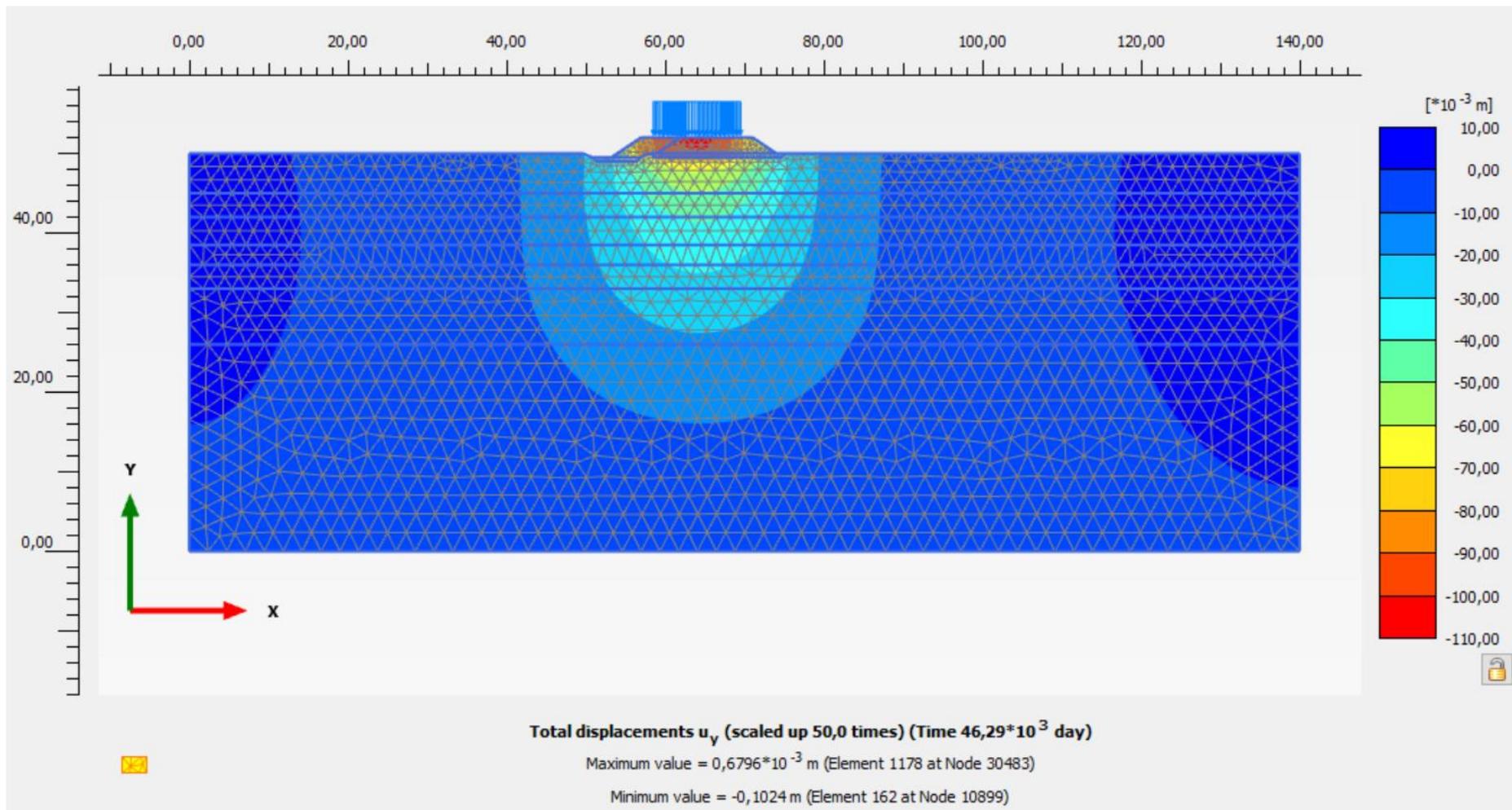


Figura 10.7: Rilevato sez. 57+600 – Spostamenti verticali lungo termine

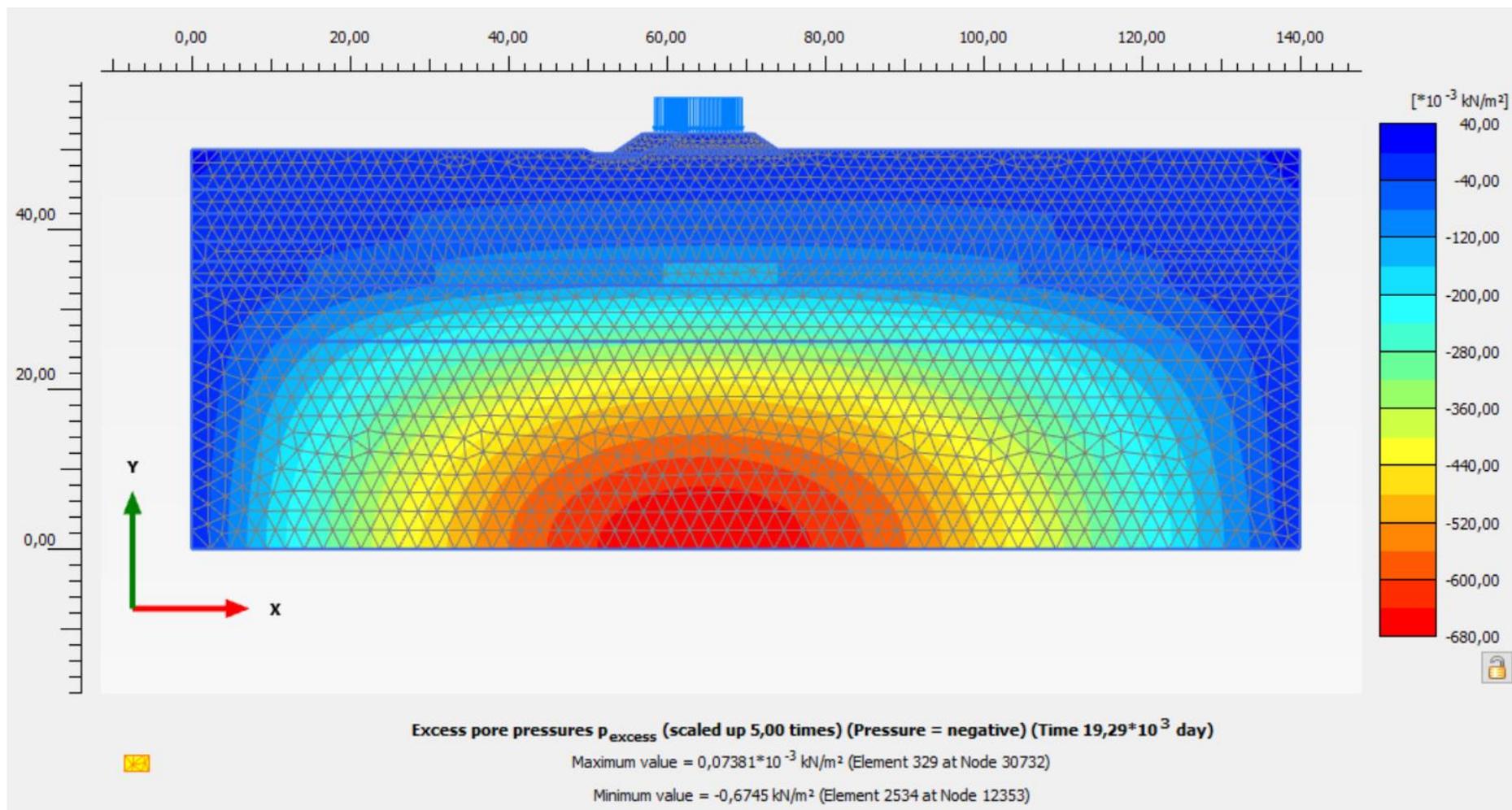


Figura 10.8: Rilevato sez. 57+600 – Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  termine costruzione

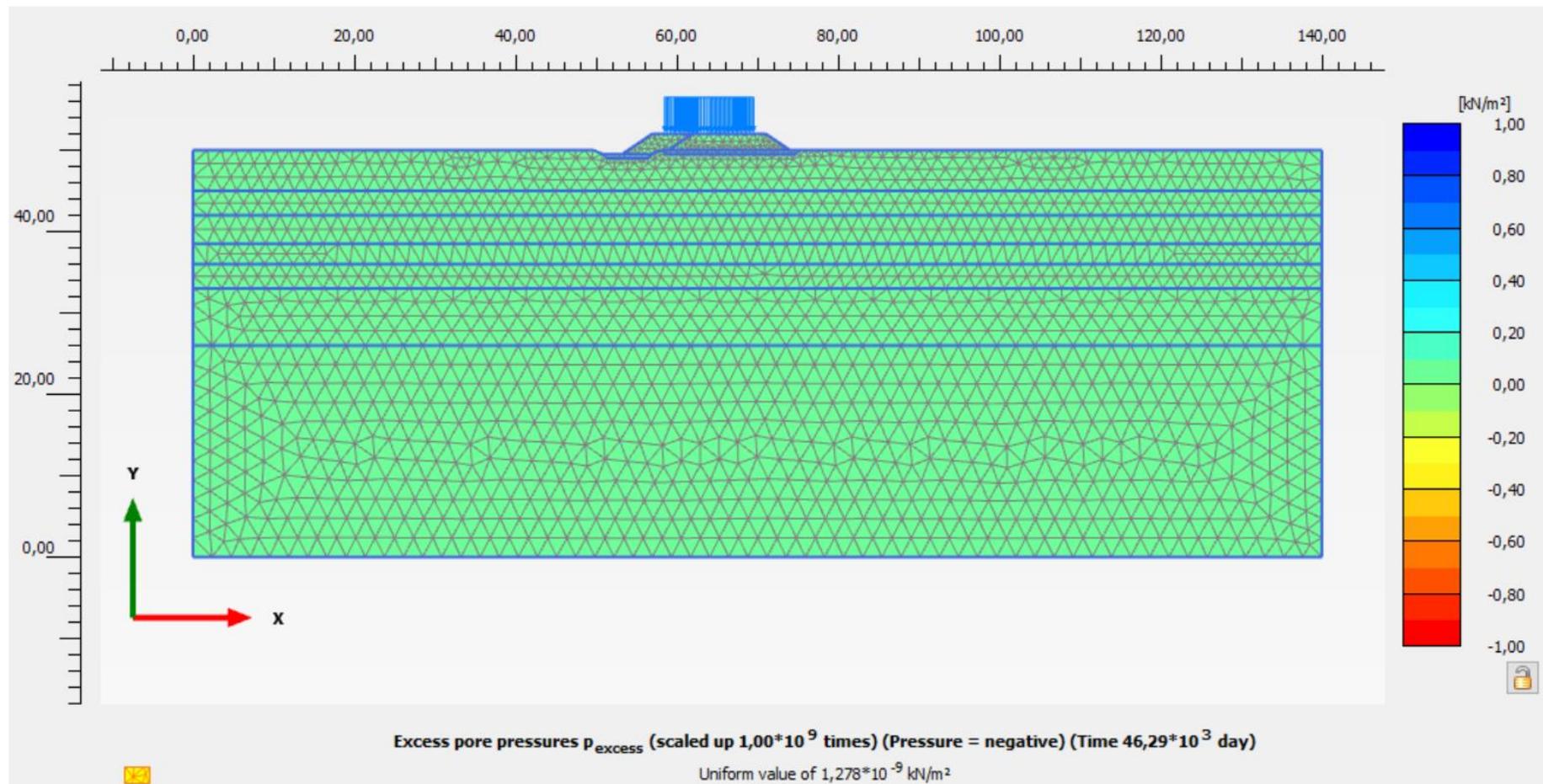
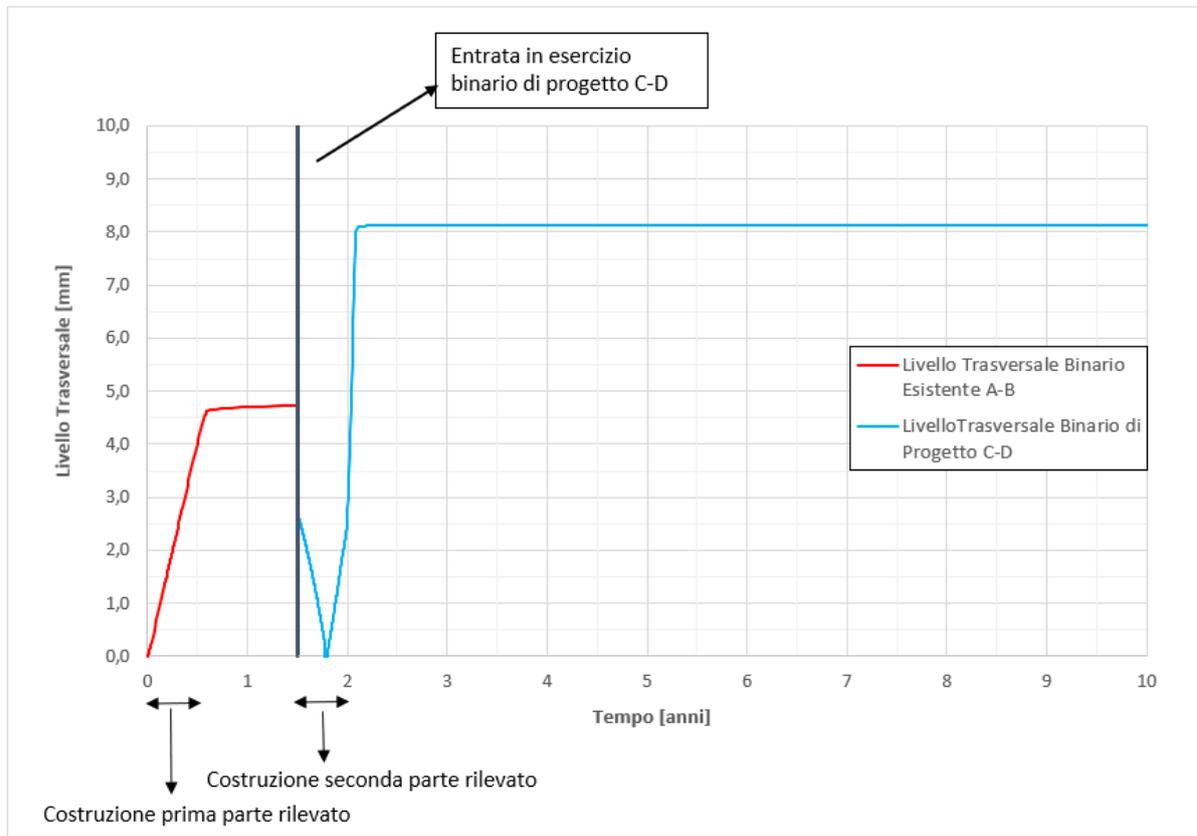


Figura 10.9: Rilevato sez. 57+600 – Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  lungo termine



**Figura 10.10: Livello trasversale, sez 57+600**

## 11. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 58+075 (VIADOTTO VI01)

### 11.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

In accordo a quanto riportato nella Relazione Geotecnica generale (Doc. Rif. [1]) e sulla base di quanto descritto nel capitolo 5., nella Tabella 11.1 e Tabella 11.2 sono riportati la stratigrafia ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto fattorizzati utilizzando i coefficienti M2 riportati nella Tabella 5.4 della presente relazione.

Si rimanda invece alla Tabella 8.1 per i valori dei parametri geotecnici relativi ai materiali antropici utilizzati per il corpo del rilevato e per lo strato di scotico (50 cm al di sotto del rilevato).

Si ricorda che, come definito al capitolo 7 del Doc. Rif. [3], le verifiche geotecniche SLU di stabilità globale dei rilevati, in campo statico, richiedono l'adozione della sola Combinazione 2 dell'Approccio 1 e pertanto l'applicazione dei soli coefficienti parziali M2, mentre per le verifiche sismiche e per le verifiche SLE, finalizzate alla determinazione dei cedimenti, sono richiesti i parametri caratteristici.

**Tabella 11.1: Stratigrafia di calcolo per la sezione 58+075**

Strato	Profondità da [m da p.c.]	Profondità a [m da p.c.]	Descrizione
Ws1	0.0	3.0	Sabbia da limosa a con limo, localmente argillosa
WRa2	3.0	8.0	Argilla limosa sabbiosa e/o limo argilloso sabbioso e/o argilla con sabbia con possibili livelli centimetrici di presenza organica
WRs2	8.0	9.5	Sabbia limosa, da debolmente argillosa ad argillosa
WRa2	9.5	13.5	Argilla limosa sabbiosa e/o limo argilloso sabbioso e/o argilla con sabbia con possibili livelli centimetrici di presenza organica
Rs1	13.5	15.0	Sabbia da debolmente limosa a limosa localmente debolmente argillosa e/o limo sabbioso
RMa	15.0	50.0	Limo argilloso/sabbioso e/o argilla limosa sabbiosa con frequenti intercalazioni di livelli sabbiosi. Possibili livelli centimetrici di materia organica e/o torba

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE</b> <b>FERROVIARI</b>	COMMESSA NM25	LOTTO 03 D 26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0000 001	REV. A

Tabella 11.2: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 58+075 – Materiali in sito

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Resistenza al taglio non drenata		Modulo di Young operativo	Rapporto di Compressione e Ricomprensione		Rapporto di Sovraconsolidazione	Permeabilità
	$\gamma_d$	$\phi'_k$	$\phi'_d$	$c'_k$	$c'_d$	$c_u$	$c_u$	$E_{op.}$	CR	RR	OCR	k
	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[m/s]
Ws1	19	34	28.3	0	0	-	-	10	-	-	-	2.0E-07
WRa2	19	25	20.5	0	0	40-50	28.6-35.7	-	0,16	0,032	2	1.0E-08
WRs2	19	33	27.5	0	0	-	-	20	-	-	-	5.0E-07
Rs1	19	33	27.5	0	0	-	-	22	-	-	-	5.0E-07
RMa	19	25	20.5	0	0	60 fino 24 m da pc; 100 oltre 24 m da pc	42.9-71.4	18.75 fino 24 m da pc; 22.5 oltre 24 m da pc.	-	-	1	1.0E-08

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli ad una quota di circa 4.5 m dal piano campagna.

## 11.2 CARICHI DI PROGETTO

Per il dettaglio dei carichi di progetto del pacchetto di armamento ferroviario e del carico da traffico assunti per le verifiche SLU e per le verifiche SLE si faccia riferimento a quanto riportato nel paragrafo 8.4.2.

Nelle verifiche SLU in condizioni sismiche, in accordo a quanto riportato nel capitolo 6, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$$K_H = + 0.052 \quad (\text{concorde alla direzione di scivolamento})$$

$$K_V = \pm 0.026 \quad (\text{verificando la più cautelativa tra negativo e positivo})$$

La condizione più cautelativa risulta essere rappresentata da  $K_V = -0.026$ .

## 11.3 VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE

Le verifiche SLU della stabilità globale del rilevato (sia in condizioni statiche che sismiche) sono state condotte tramite il codice di calcolo Slope/W (Doc. Rif. [13]). Le combinazioni di carico adottate nelle analisi fanno riferimento rispettivamente ai coefficienti parziali (A2+M2) per le analisi in campo statico e ai valori caratteristici per le analisi sismiche.

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>R10000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>49 di 87</b>

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico ferroviario. Tra esse, è definita critica quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo. Come da NTC 2018, la verifica SLU di stabilità globale risulta soddisfatta quando la superficie di scivolamento più critica, tra tutte quelle cinematicamente possibili, ha un fattore di sicurezza pari almeno ad 1.1 in condizioni statiche e pari almeno a 1.2 in condizioni sismiche, ossia risultino soddisfatte le seguenti disuguaglianze:

- analisi statica:  $R/E_d \geq \gamma_R$  con  $\gamma_R=1.1$
- analisi sismica:  $R/E_d \geq \gamma_R$  con  $\gamma_R=1.2$

essendo:

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

$R_d$  =  $R/\gamma_R$  valore di progetto della resistenza.

Nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore minore di 1 metro, considerate corticali e non rappresentative della situazione reale in quanto la scarpata verrà rifinita con la copertura a verde.

### 11.3.1 Risultati

I risultati ottenuti nelle analisi di stabilità globale sono riportati in Tabella 11.3 insieme alle figure di riferimento

**Tabella 11.3: Risultati verifiche di stabilità globale per la sezione al km 58+075**

ANALISI	$R/E_d$	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA	1.127	Figura 11.1
PSEUDOSTATICA	1.286	Figura 11.2

Le verifiche di stabilità globale in campo statico e sismico risultano soddisfatte.

**ANALISI STATICA**

Viadotto VI01 km 58+075.

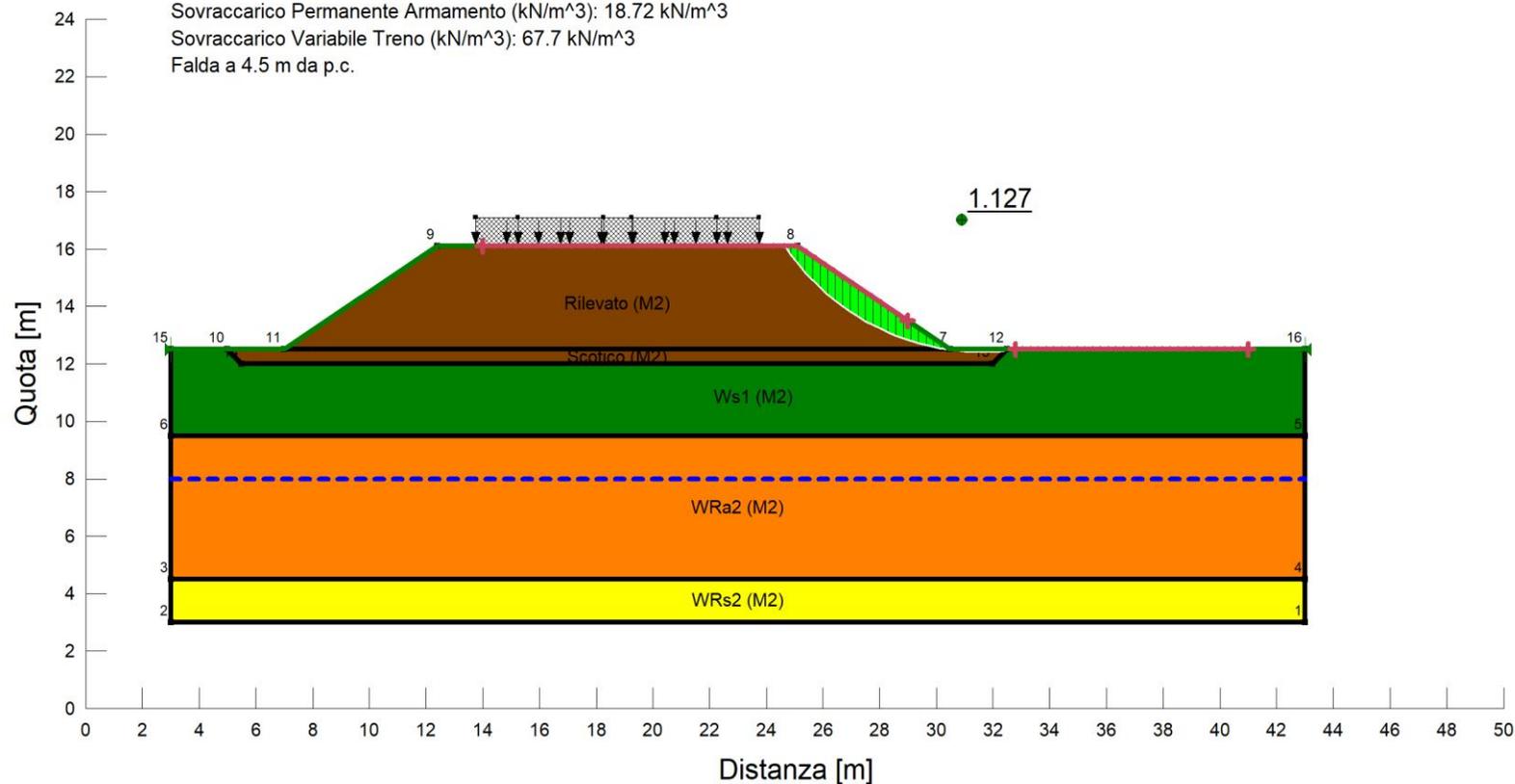
kh: 0

kv: 0

Sovraccarico Permanente Armamento (kN/m<sup>3</sup>): 18.72 kN/m<sup>3</sup>

Sovraccarico Variabile Treno (kN/m<sup>3</sup>): 67.7 kN/m<sup>3</sup>

Falda a 4.5 m da p.c.



Name: Rilevato (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 32.01 °

Name: Scotico (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 32.01 °

Name: Ws1 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 28.35 °

Name: WRa2 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 20.46 °

Name: WRs2 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 27.45 °

**Figura 11.1: Rilevato H=3.6 m, sez.58+075 - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2**

**ANALISI PSEUDOSTATICA**

Viadotto VI01 km 58+075.

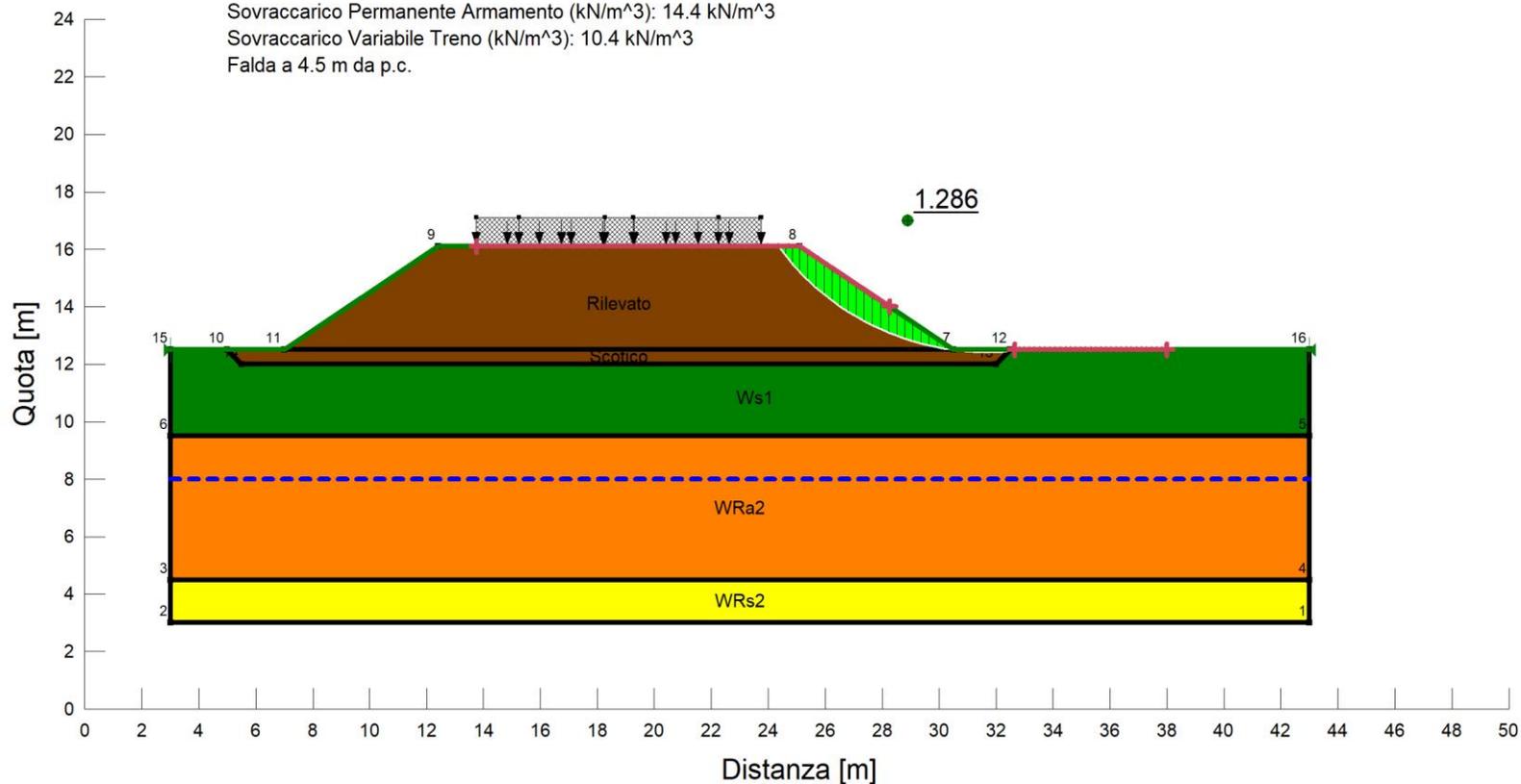
kh: 0.052

kv: -0.026

Sovraccarico Permanente Armamento (kN/m<sup>3</sup>): 14.4 kN/m<sup>3</sup>

Sovraccarico Variabile Treno (kN/m<sup>3</sup>): 10.4 kN/m<sup>3</sup>

Falda a 4.5 m da p.c.



Name: Rilevato  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 38 °

Name: Scotico  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 38 °

Name: Ws1  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 34 °

Name: WRa2  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 25 °

Name: WRs2  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °

**Figura 11.2: Rilevato H=3.6 m, sez. 58+075 - Analisi di stabilità globale in campo sismico**

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>52 di 87</b>

## 11.4 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

### 11.4.1 Modelli e fasi di calcolo

Il modello utilizzato per queste analisi è mostrato nella Figura 11.3 e rappresenta il rilevato di progetto alla progressiva 58+075. L'altezza del rilevato in oggetto è pari a circa 3.6 metri escluso il pacchetto di armamento ferroviario (ballast, traversine e rotaie), modellato nelle analisi come sovraccarico distribuito. La stratigrafia di calcolo utilizzata ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici sono riportati in Tabella 11.1 e Tabella 11.2.

Si tratta di modelli bi-dimensionali in cui è mostrato il rilevato in sezione, con la propria geometria ed il sovraccarico da armamento ferroviario.

Per definire l'andamento dei cedimenti nel tempo viene omesso nell'analisi il sovraccarico da traffico ferroviario in accordo a quanto specificato in Doc. Rif. [5].

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- generazione dello stato tensionale iniziale con piano campagna attuale;
- costruzione del rilevato (durata 6 mesi);
- costruzione dell'armamento ferroviario sul rilevato per una durata di 30 giorni;
- consolidazione del rilevato fino alla messa in opera (11 mesi);
- consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio della linea ferroviaria (durata 6 mesi, 1 anno, 3 anni, 10 anni, 20 anni e 75 anni).

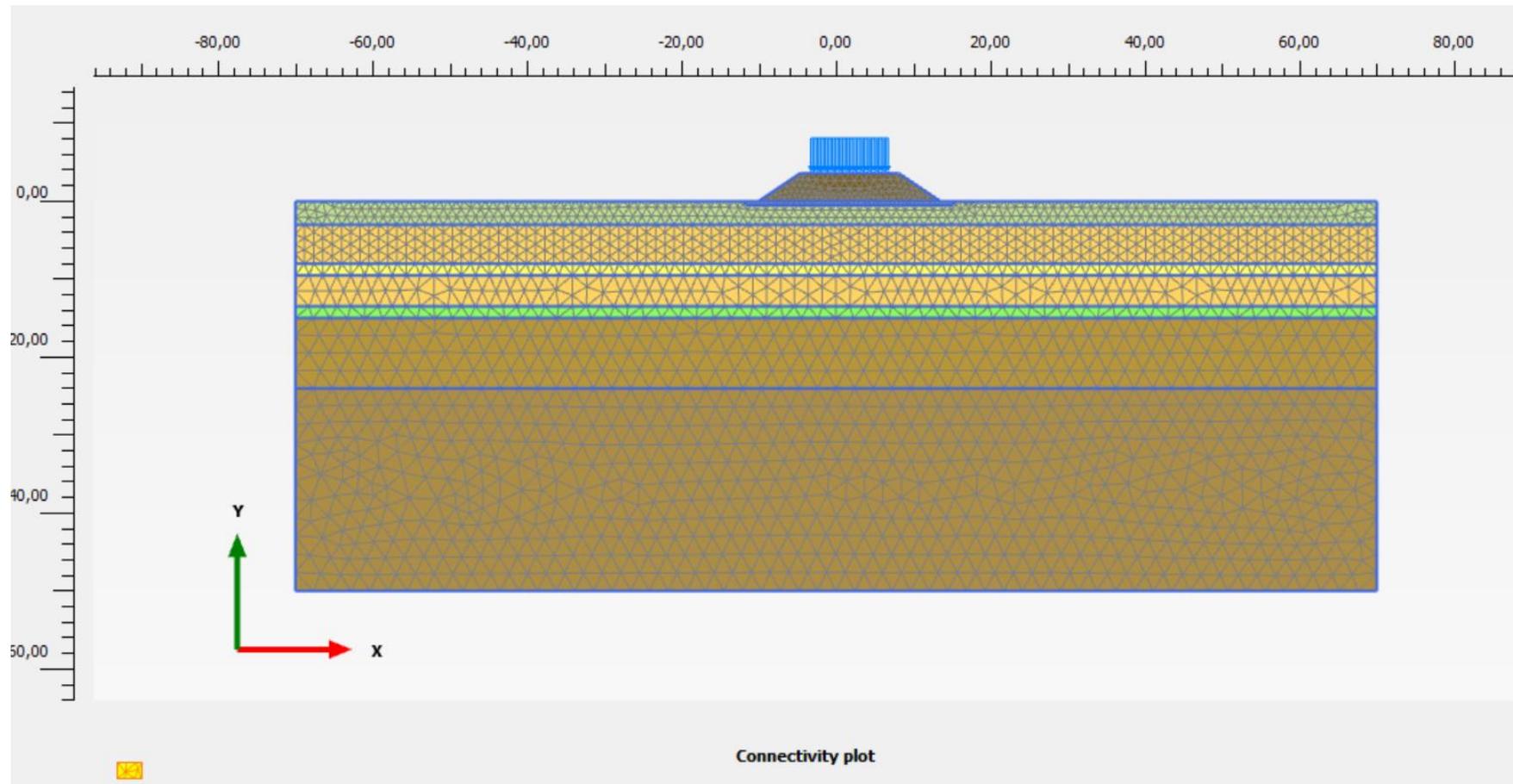


Figura 11.3: Modello rilevato Sez. 58+075

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>54 di 87</b>

#### 11.4.2 Risultati

Con riferimento a Manuale di Progettazione RFI DINIC MA CS 00 001 C (parte IV), è necessario garantire il rispetto dei seguenti criteri di ammissibilità:

- cedimento residuo (differenza tra cedimento di lungo termine e cedimento a fine costruzione rilevato) inferiore a 5cm;
- cedimento residuo inferiore al 10% del cedimento di lungo termine.

In Figura 11.4 e in Figura 11.5 è riportato lo spostamento verticale  $u_y$  rispettivamente in corrispondenza di una sezione verticale coincidente con l'asse ferroviario e di una sezione orizzontale alla base del rilevato al termine delle seguenti fasi:

- Al termine di tutte le fasi di costruzione del rilevato e messa in opera.
- Dopo 6 mesi dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria.
- Dopo 1 anno dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria.
- Dopo 3 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria.
- Dopo 10 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria.
- Dopo 20 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria.
- Dopo 75 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria.

Come è possibile osservare in Figura 11.4 e in Figura 11.5, dopo 6 mesi dal termine della costruzione il cedimento è prossimo al cedimento a lungo termine (75 anni).

Risulta che al termine della costruzione il cedimento è pari a 11.9cm, mentre il cedimento dopo 75 anni è pari a 12.3cm. Ne consegue che i cedimenti residui sono pari a 0.4 cm, inferiori al valore limite di 5cm e inferiori al 10% dei cedimenti teorici di lungo termine.

In Figura 11.6, Figura 11.7, Figura 11.8 e Figura 11.9 sono riportati i cedimenti a fine costruzione e a lungo termine e le sovrappressioni in eccesso per le stesse fasi di calcolo.

Alla luce di tali risultati, con i tempi di realizzazione sopra previsti, si ritiene che i cedimenti calcolati rispettino i criteri di ammissibilità sopra riportati.

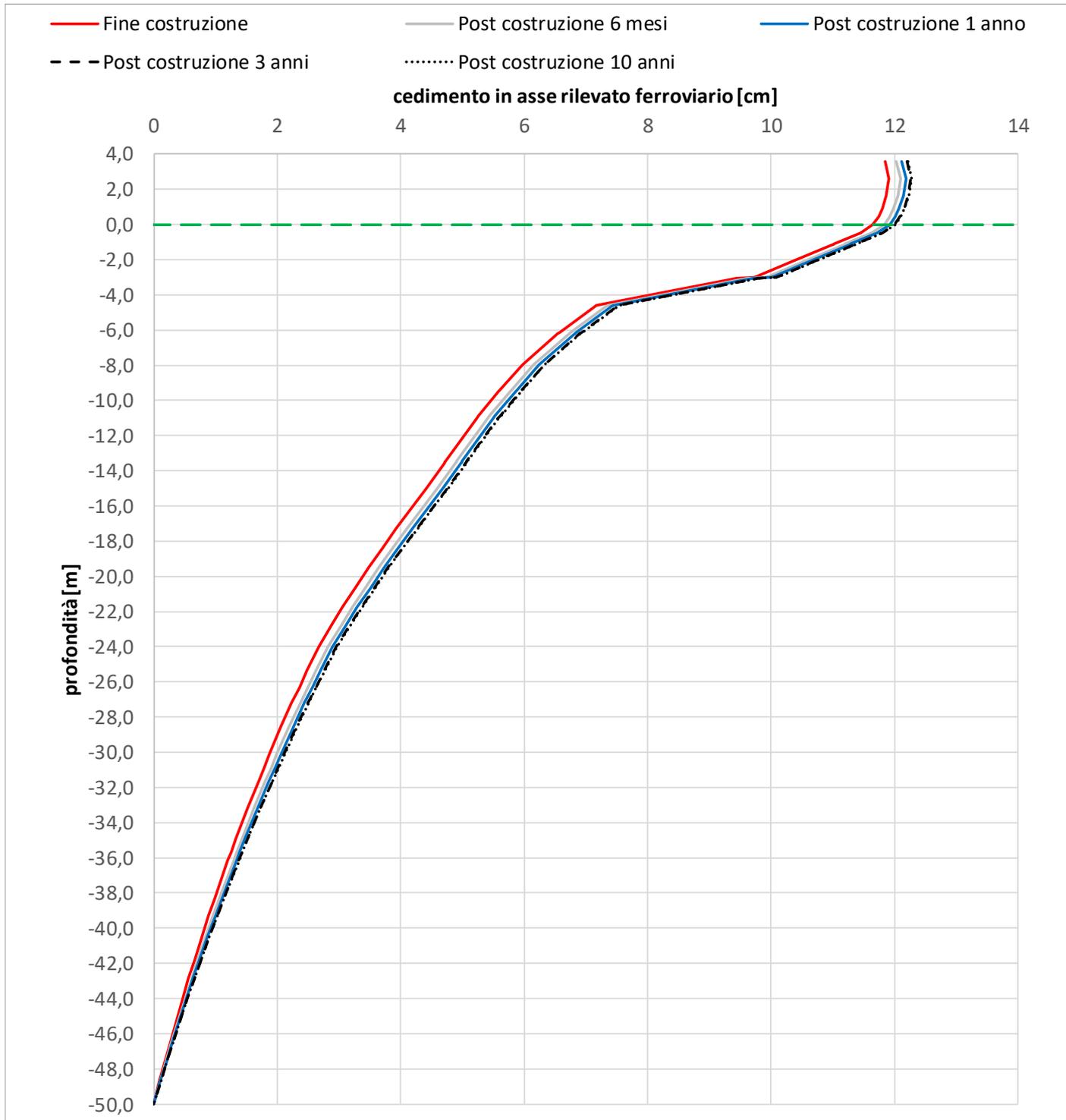
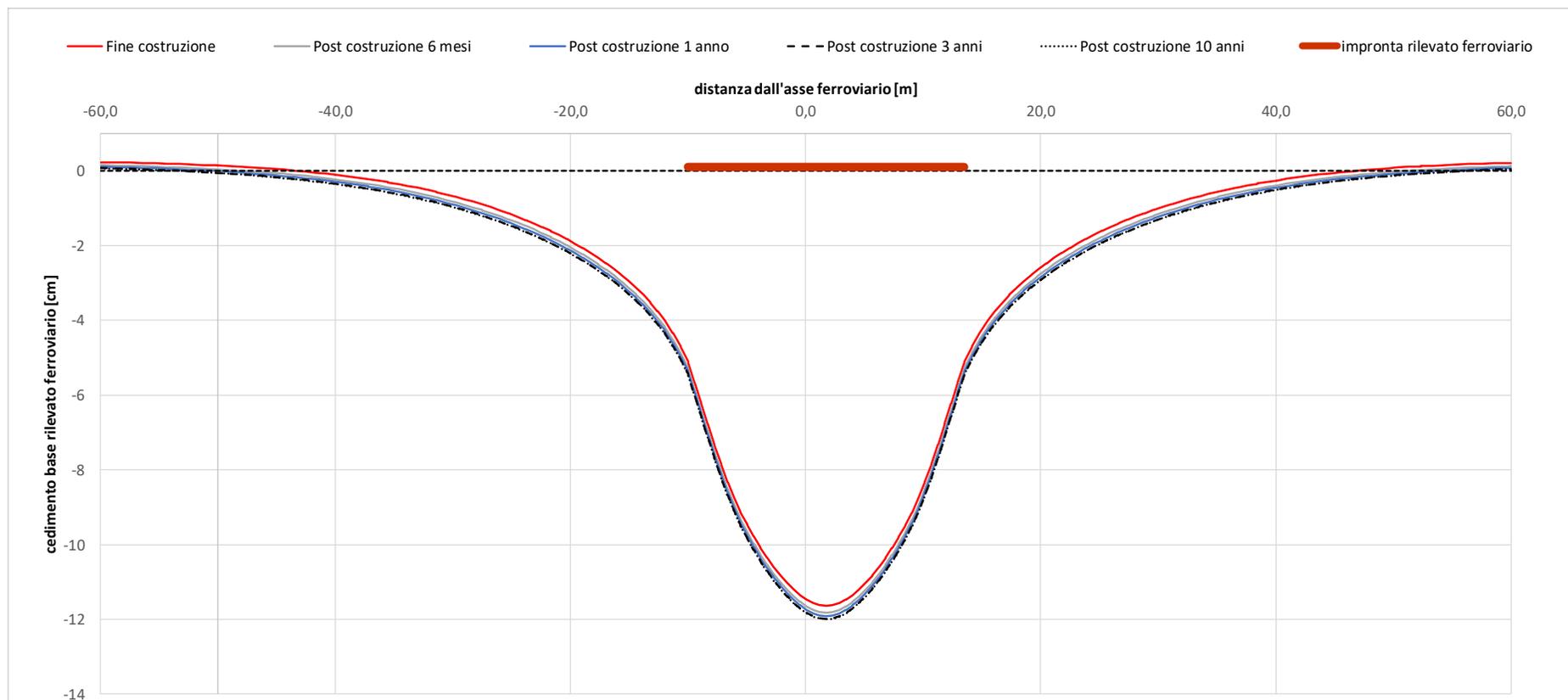


Figura 11.4: Rilevato sez. 58+075 – Spostamenti verticali in corrispondenza dell'asse ferroviario



**Figura 11.5: Rilevato sez.58+075 – Spostamenti verticali in corrispondenza della base del rilevato ferroviario**

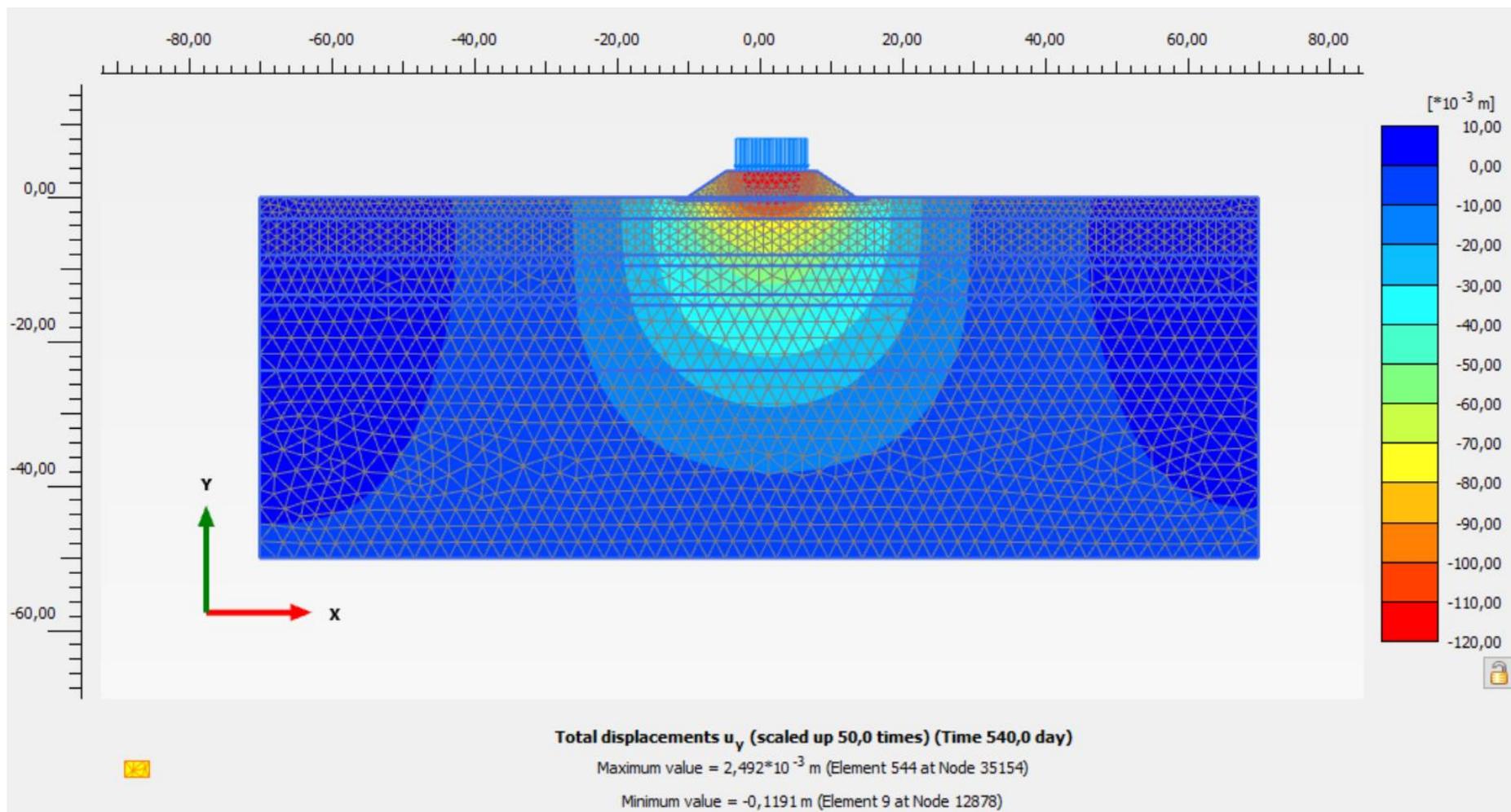


Figura 11.6: Rilevato sez. 58+075 – Spostamenti verticali termine costruzione

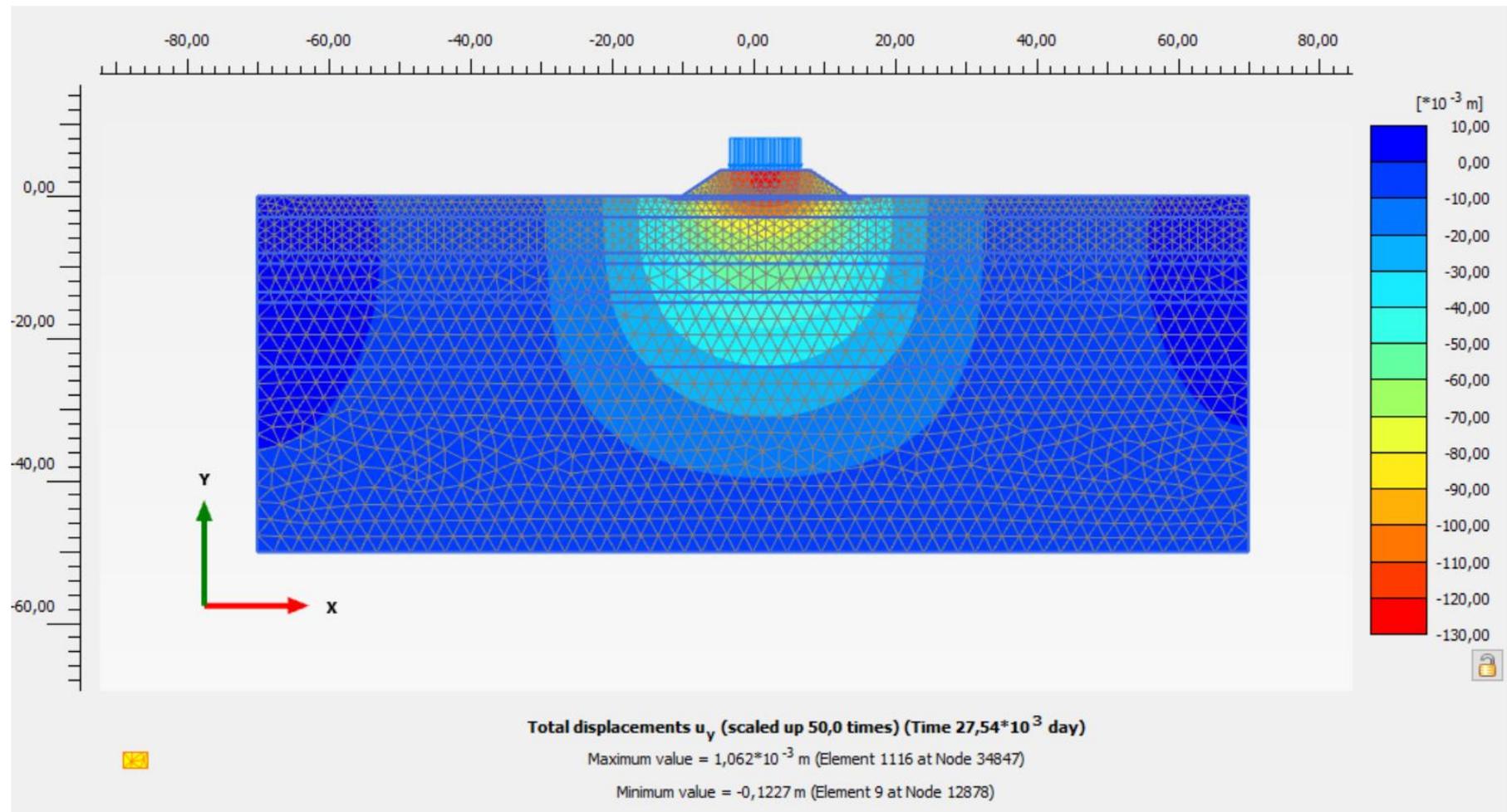


Figura 11.7: Rilevato sez. 58+075 – Spostamenti verticali lungo termine

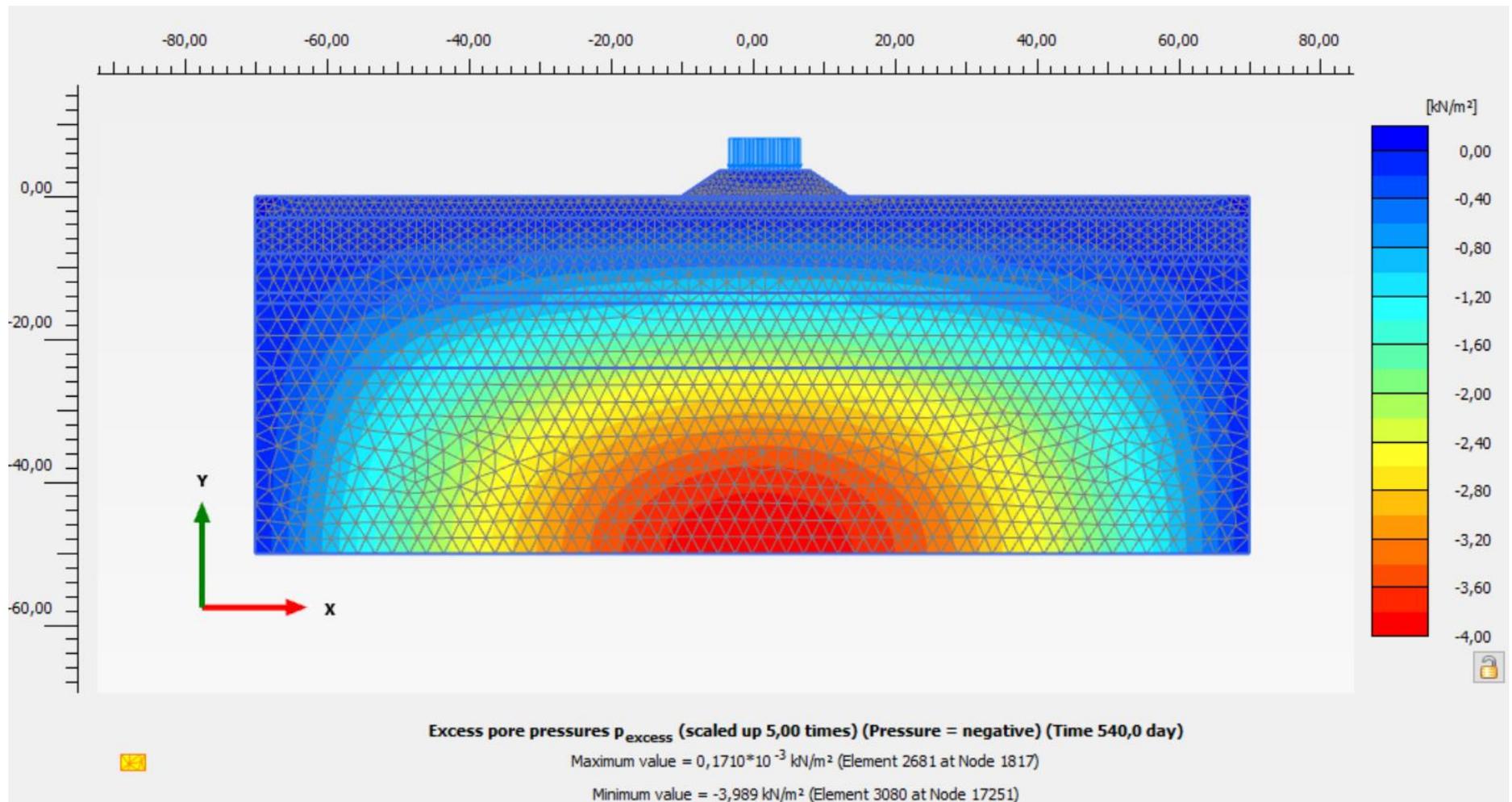


Figura 11.8: Rilevato sez. 58+075 – Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  termine costruzione

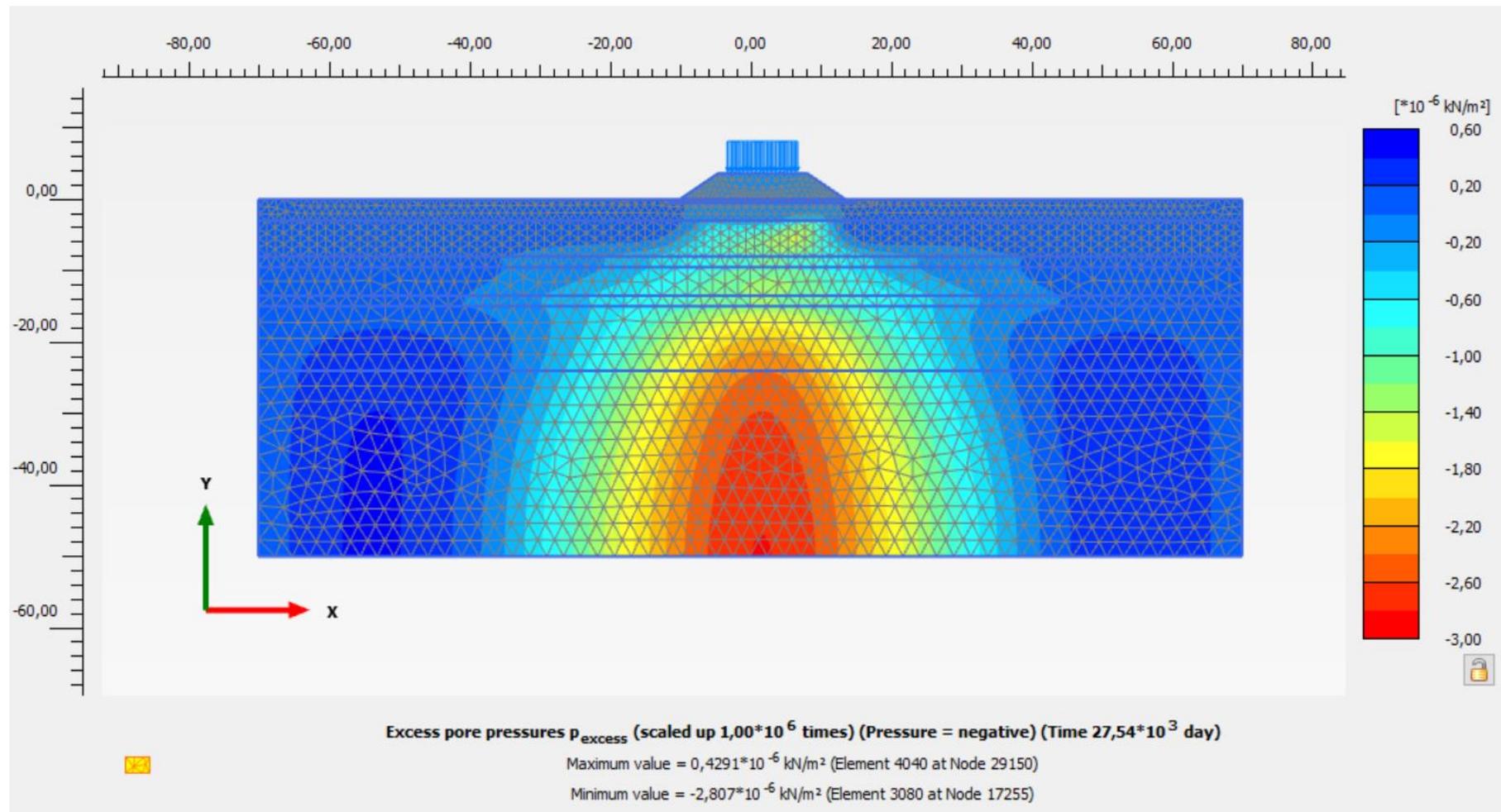


Figura 11.9: Rilevato sez. 58+075 – Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  lungo termine

## 12. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 67+150 (VIADOTTO SUL FIUME OGLIO VI02)

### 12.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

In accordo a quanto riportato nella Relazione Geotecnica generale (Doc. Rif. [1]) e sulla base di quanto descritto nel capitolo 5., nella Tabella 12.1 e Tabella 12.2 sono riportati la stratigrafia ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto fattorizzati utilizzando i coefficienti M2 riportati nella Tabella 5.4 della presente relazione.

Si rimanda invece alla Tabella 8.1 per i valori dei parametri geotecnici relativi ai materiali antropici utilizzati per il corpo del rilevato e per lo strato di scotico (50 cm al di sotto del rilevato).

Si ricorda che, come definito al capitolo 7 del Doc. Rif. [3], le verifiche geotecniche SLU di stabilità globale dei rilevati, in campo statico, richiedono l'adozione della sola Combinazione 2 dell'Approccio 1 e pertanto l'applicazione dei soli coefficienti parziali M2, mentre per le verifiche sismiche e per le verifiche SLE, finalizzate alla determinazione dei cedimenti, sono richiesti i parametri caratteristici.

**Tabella 12.1: Stratigrafia di calcolo per la sezione 67+150**

Strato	Profondità da [m da p.c.]	Profondità a [m da p.c.]	Descrizione
Aa	0.0	6.0	Deposito alluvionale limoso sabbioso, da debolmente argilloso ad argilloso e/o argilla da limosa a con limo
As	6.0	9.0	Deposito alluvionale di sabbia limosa, localmente argillosa, con rara ghiaia
WRa2	9.0	15.0	Argilla limosa sabbiosa e/o limo argilloso sabbioso e/o argilla con sabbia con possibili livelli centimetrici di presenza organica
Rs1	15.0	42.5	Sabbia da debolmente limosa a limosa localmente debolmente argillosa e/o limo sabbioso
Ra1	42.5	50.0	Limo sabbioso e/o argilla limosa debolmente sabbiosa

**Tabella 12.2: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 67+150 – Materiali in sito**

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Resistenza al taglio non drenata		Modulo di Young operativo	Rapporto di Compressione e Ricomprensione		Rapporto di Sovraconsolidazione	Permeabilità
	$\gamma_d$	$\phi'_k$	$\phi'_d$	$c'_k$	$c'_d$	$c_u$	$c_u$	$E_{op.}$	CR	RR	OCR	k
	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[m/s]
Aa	19	26	21.3	-	-	30 primi 3 metri da pc; 60 da 3 a 6 metri.	21.4-42.9	-	0,34	0,017	1,5	5.0E-08
As	19	33	27.5	-	-	-	-	17.5	-	-	-	5.0E-07
WRa2	19	25	20.5	-	-	70	50	-	0,32	0,016	2	1.0E-08
Rs1	19	33	27.5	-	-	-	-	21.2 fino 25 m da pc; 30 oltre 25 m da pc.	-	-	-	5.0E-07
Ra1	19	24	19.6	-	-	70	50	-	0,36	0,018	1	1.0E-08

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli ad una quota corrispondente al piano campagna.

## 12.2 CARICHI DI PROGETTO

Per il dettaglio dei carichi di progetto del pacchetto di armamento ferroviario e del carico da traffico assunti per le verifiche SLU e per le verifiche SLE si faccia riferimento a quanto riportato nel paragrafo 8.4.2.

Nelle verifiche SLU in condizioni sismiche, in accordo a quanto riportato nel capitolo 6, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$$K_H = + 0.052 \quad (\text{concorde alla direzione di scivolamento})$$

$$K_V = \pm 0.026 \quad (\text{verificando la più cautelativa tra negativo e positivo})$$

La condizione più cautelativa risulta essere rappresentata da  $K_V = -0.026$ .

## 12.3 VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE

Le verifiche SLU della stabilità globale del rilevato (sia in condizioni statiche che sismiche) sono state condotte tramite il codice di calcolo Slope/W (Doc. Rif. [13]). Le combinazioni di carico adottate nelle analisi fanno riferimento rispettivamente ai coefficienti parziali (A2+M2) per le analisi in campo statico e ai valori caratteristici per le analisi sismiche.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE</b> <b>FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>R10000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>63 di 87</b>

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico ferroviario. Tra esse, è definita critica quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo. Come da NTC 2018, la verifica SLU di stabilità globale risulta soddisfatta quando la superficie di scivolamento più critica, tra tutte quelle cinematicamente possibili, ha un fattore di sicurezza pari almeno ad 1.1 in condizioni statiche e pari almeno a 1.2 in condizioni sismiche, ossia risultino soddisfatte le seguenti disuguaglianze:

- analisi statica:  $R/E_d \geq \gamma_R$  con  $\gamma_R=1.1$
- analisi sismica:  $R/E_d \geq \gamma_R$  con  $\gamma_R=1.2$

essendo:

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

$R_d$  =  $R/\gamma_R$  valore di progetto della resistenza.

Nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore minore di 1 metro, considerate corticali e non rappresentative della situazione reale in quanto la scarpata verrà rifinita con la copertura a verde.

### 12.3.1 Risultati

I risultati ottenuti nelle analisi di stabilità globale sono riportati in Tabella 12.3 insieme alle figure di riferimento. Dove le verifiche non risultano soddisfatte, è stato rappresentato l'involuppo di tutte le superfici di scorrimento con fattore di sicurezza inferiore a quello richiesto dalla normativa.

**Tabella 12.3: Risultati verifiche di stabilità globale per la sezione al km 67+150 senza bonifica**

ANALISI	R/ $E_d$	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA	0.942	Figura 12.1
PSEUDOSTATICA	1.125	Figura 12.2

Le verifiche di stabilità globale in campo statico e sismico non risultano soddisfatte. Si è pertanto ipotizzato, al fine di migliorare il terreno naturale sottostante il rilevato, uno strato di bonifica al di sotto dello scotico, quest'ultimo previsto di 0.5 m. Nelle analisi lo spessore dello strato di bonifica è stato approfondito fino ad ottenere il raggiungimento del fattore di sicurezza richiesto dalla normativa vigente. Nel caso in oggetto lo spessore di bonifica richiesto al di sotto dello strato di scotico, è pari a 2 m (scotico + bonifica =

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>

2.5 m). Il materiale sostituito è stato modellato con le stesse caratteristiche del materiale sostituito nello scotico (si veda Tabella 8.1). I risultati ottenuti nelle analisi di stabilità globale sono riportati in Tabella 12.4 insieme alle figure di riferimento.

**Tabella 12.4: Risultati verifiche di stabilità globale per la sezione al km 67+150 con scotico + bonifica =2.5m**

ANALISI	R/E <sub>d</sub>	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA	1.236	Figura 12.3
PSEUDOSTATICA	1.357	Figura 12.4

Le verifiche di stabilità globale in campo statico e sismico risultano ora soddisfatte.

Al fine di soddisfare le verifiche di stabilità richieste dalla normativa vigente, la bonifica del terreno sarà necessaria PER altezze di rilevato > di 5.0m. Per rilevati di altezza ≤ 5m le verifiche risultano soddisfatte nella configurazione che prevede il solo scotico di 50 cm. I risultati ottenuti nelle analisi di stabilità globale per un rilevato di 5m sono riportati in Tabella 12.5 insieme alle figure di riferimento

**Tabella 12.5: HRIL=5.0m - Risultati verifiche di stabilità globale per la sezione al km 67+150 circa**

ANALISI	R/E <sub>d</sub>	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA	1.151	Figura 12.5
PSEUDOSTATICA	1.283	Figura 12.6

**ANALISI STATICA**

Rilevato di approccio Viadotto Oglio - km 67+150 LS ca.

kh:0

kv:0

Sovraccarico Permanente Armamento (kN/m<sup>3</sup>): 18.72 kN/m<sup>3</sup>

Sovraccarico Variabile Treno (kN/m<sup>3</sup>): 67.7 kN/m<sup>3</sup>

Falda corrispondente al p.c.

Name: Rilevato (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 32.01 °

Name: Aa\_1 (M2)  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 21.4 kPa

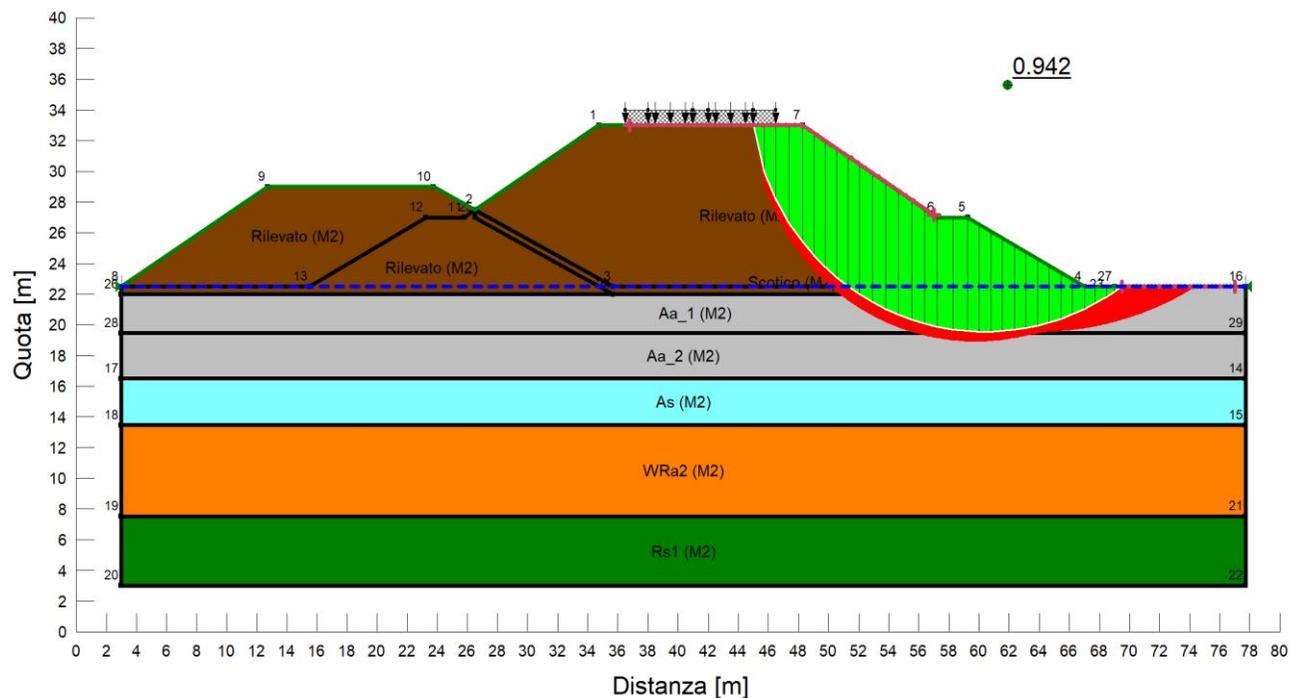
Name: As (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 27.45 °

Name: WRa2 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 20.46 °

Name: Rs1 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 27.45 °

Name: Scotico (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 32.01 °

Name: Aa\_2 (M2)  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 42.9 kPa



**Figura 12.1: Rilevato H=10.5 m, sez 67+150 - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2 senza strato di bonifica.**

**ANALISI PSEUDOSTATICA**

Rilevato di approccio Viadotto Oglio - km 67+150 LS ca.

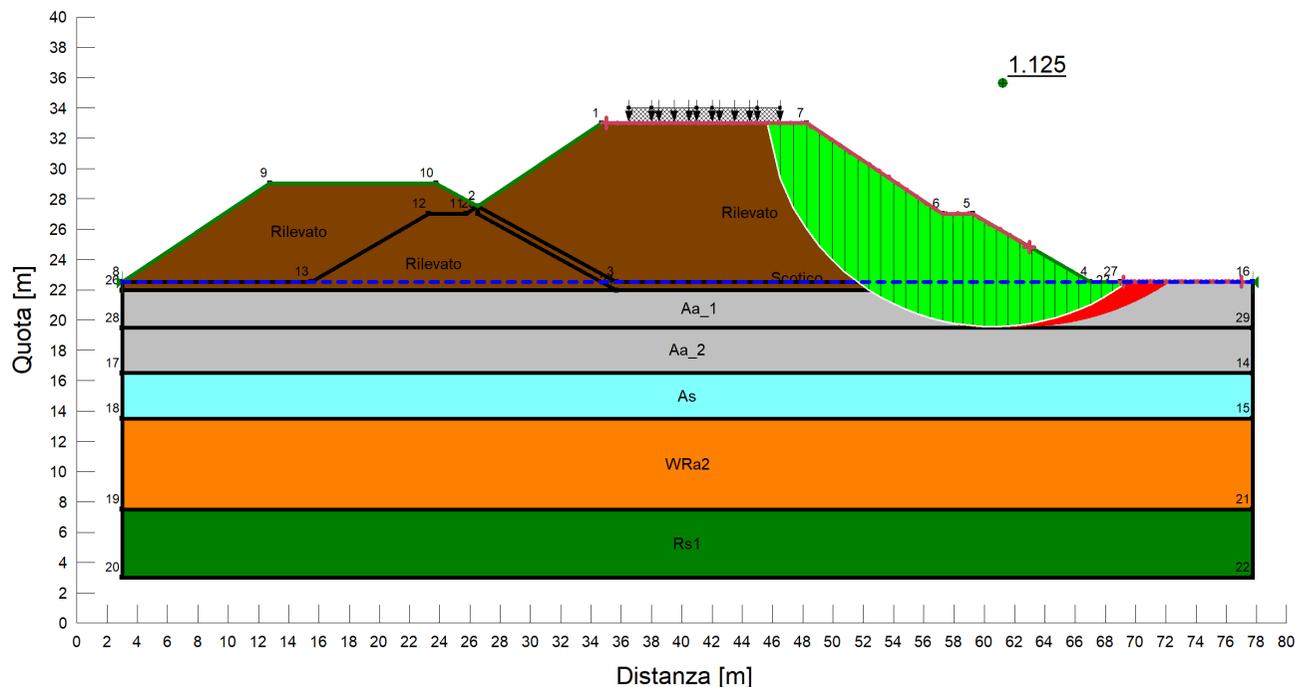
kh: 0.052

kv: -0.026

Sovraccarico Permanente Armamento (kN/m<sup>3</sup>): 14.4 kN/m<sup>3</sup>

Sovraccarico Variabile Treno (kN/m<sup>3</sup>): 10.4 kN/m<sup>3</sup>

Falda corrispondente al p.c.



Name: Rilevato  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 38 °

Name: Scotico  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 38 °

Name: Aa\_1  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 30 kPa

Name: As  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °

Name: WRa2  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 25 °

Name: Rs1  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °

Name: Aa\_2  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 60 kPa

**Figura 12.2: Rilevato H=10.5 m, sez 67+150 - Analisi di stabilità globale in campo sismico senza strato di bonifica.**

**ANALISI STATICA**

Rilevato di approccio Viadotto Oglio - km 67+150 LS ca.

kh:0

kv:0

Sovraccarico Permanente Armamento (kN/m<sup>3</sup>): 18.72 kN/m<sup>3</sup>

Sovraccarico Variabile Treno (kN/m<sup>3</sup>): 67.7 kN/m<sup>3</sup>

Falda corrispondente al p.c.

Name: Rilevato (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 32.01 °

Name: Aa\_1 (M2)  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 21.4 kPa

Name: As (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 27.45 °

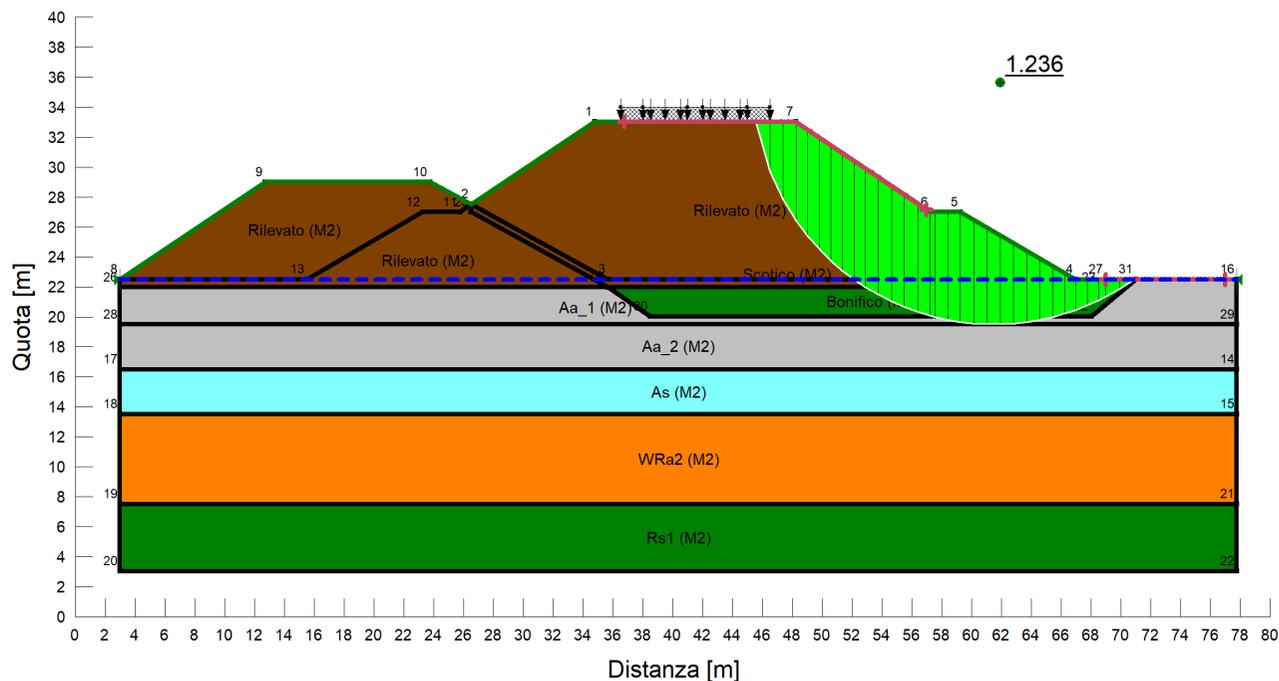
Name: WRa2 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 20.46 °

Name: Rs1 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 27.45 °

Name: Scotico (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 32.01 °

Name: Aa\_2 (M2)  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 42.9 kPa

Name: Bonifico (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 32.01 °



**Figura 12.3: Rilevato H=10.5 m, sez 67+150 - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2 con scotico + bonifica =2.5m**

**ANALISI PSEUDOSTATICA**

Rilevato di approccio Viadotto Oglio - km 67+150 LS ca.

kh: 0.052

kv: -0.026

Sovraccarico Permanente Armamento (kN/m<sup>3</sup>): 14.4 kN/m<sup>3</sup>

Sovraccarico Variabile Treno (kN/m<sup>3</sup>): 10.4 kN/m<sup>3</sup>

Falda corrispondente al p.c.

Name: Rilevato  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 38 °

Name: Scotico  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 38 °

Name: Aa\_1  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 30 kPa

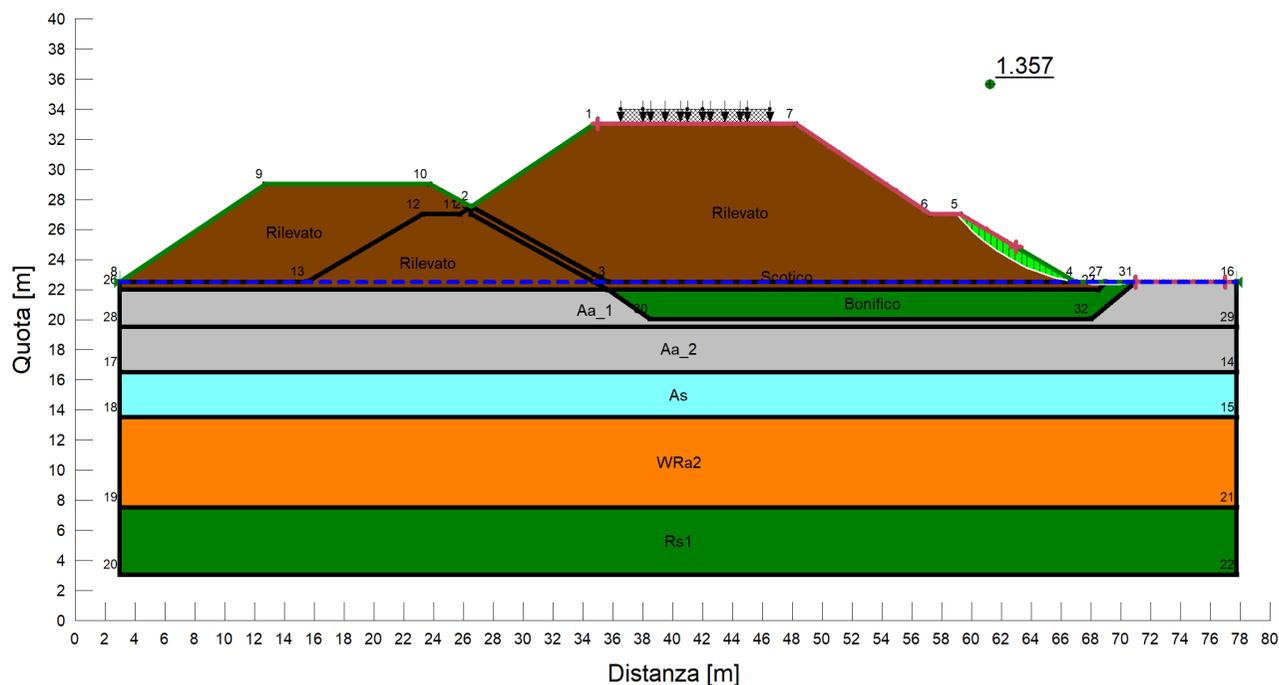
Name: As  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °

Name: WRa2  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 25 °

Name: Rs1  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °

Name: Aa\_2  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 60 kPa

Name: Bonifico  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 38 °



**Figura 12.4: Rilevato H=10.5 m, sez 67+150 - Analisi di stabilità globale in campo sismico con scotico + bonifica =2.5m**

**ANALISI STATICA**

Rilevato di approccio Viadotto Oglio - H=5m

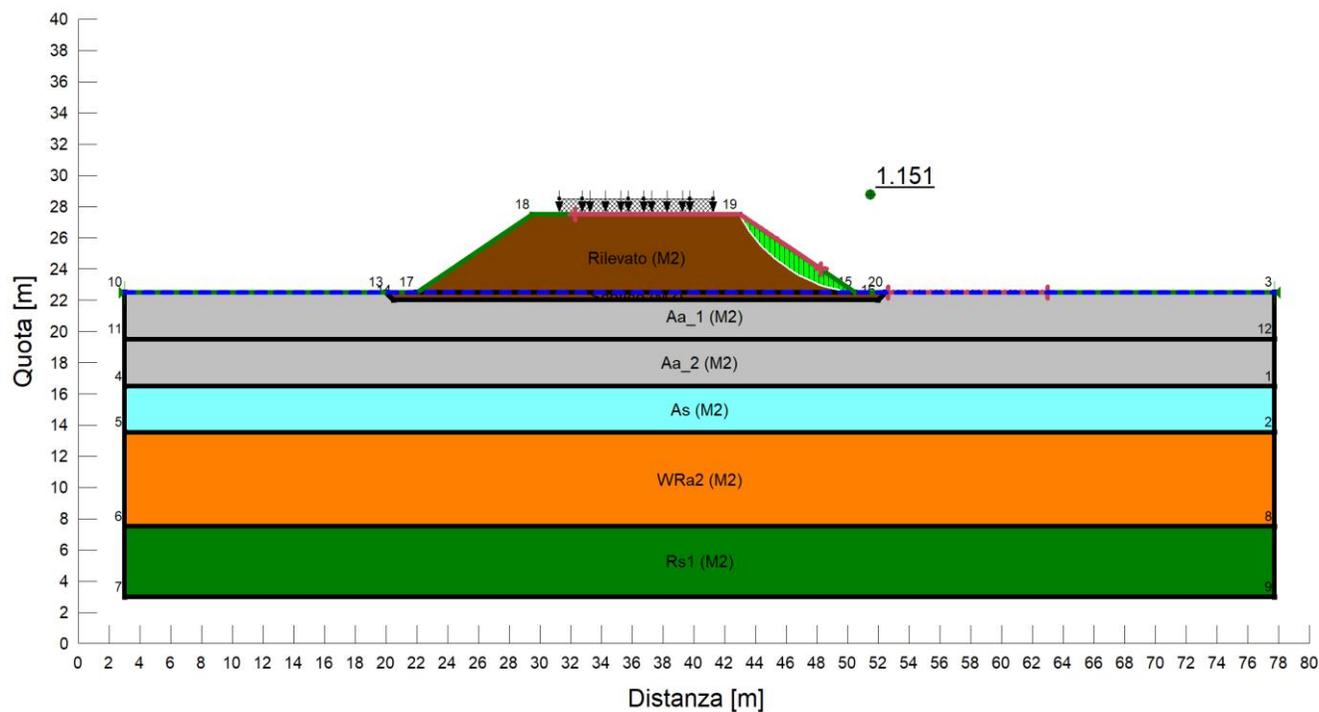
kh:0

kv:0

Sovraccarico Permanente Armamento (kN/m<sup>3</sup>): 18.72 kN/m<sup>3</sup>

Sovraccarico Variabile Treno (kN/m<sup>3</sup>): 67.7 kN/m<sup>3</sup>

Falda corrispondente al p.c.



Name: Rilevato (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 32.01 °

Name: Aa\_1 (M2)  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 21.4 kPa

Name: As (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 27.45 °

Name: WRa2 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 20.46 °

Name: Rs1 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 27.45 °

Name: Scotico (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 32.01 °

Name: Aa\_2 (M2)  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 42.9 kPa

**Figura 12.5: Rilevato H=5 m - Analisi di stabilità globale in campo statico.**

**ANALISI PSEUDOSTATICA**

Rilevato di approccio Viadotto Oglio - H=5m.

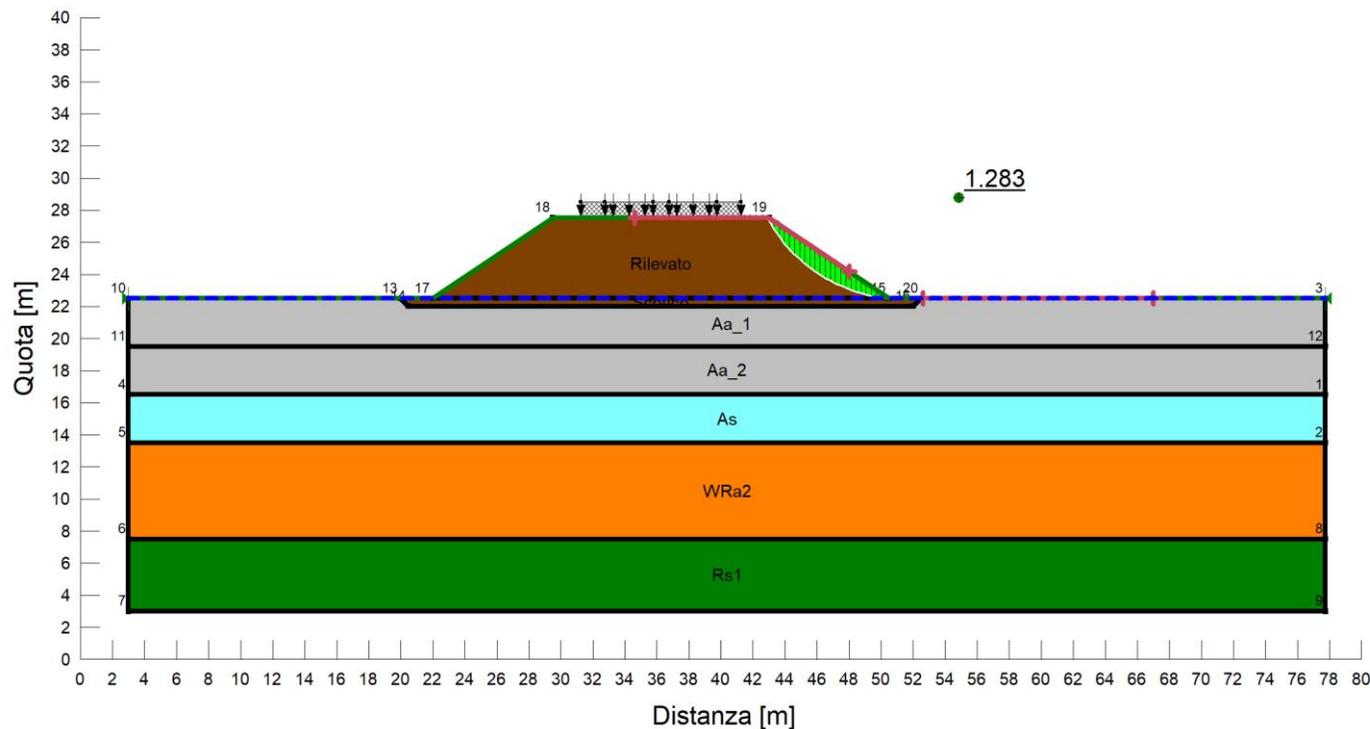
kh: 0.052

kv: -0.026

Sovraccarico Permanente Armamento (kN/m<sup>3</sup>): 14.4 kN/m<sup>3</sup>

Sovraccarico Variabile Treno (kN/m<sup>3</sup>): 10.4 kN/m<sup>3</sup>

Falda corrispondente al p.c.



Name: Rilevato  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 38 °

Name: Scotico  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 20 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 38 °

Name: Aa\_1  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 30 kPa

Name: As  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °

Name: WRa2  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 25 °

Name: Rs1  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °

Name: Aa\_2  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 60 kPa

**Figura 12.6: Rilevato H=5 m - Analisi di stabilità globale in campo sismico.**

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>71 di 87</b>

## 12.4 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

### 12.4.1 Modelli e fasi di calcolo

Il modello utilizzato per queste analisi è mostrato nella Figura 12.7 e rappresenta il rilevato di progetto alla progressiva 67+150. L'altezza del rilevato in oggetto è pari a circa 10.5 metri escluso il pacchetto di armamento ferroviario (ballast, traversine e rotaie), modellato nelle analisi come sovraccarico distribuito. La stratigrafia di calcolo utilizzata ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici sono riportati in Tabella 12.1 e Tabella 12.2.

Si tratta di modelli bi-dimensionali in cui è mostrato il rilevato in sezione, con la propria geometria ed il sovraccarico da armamento ferroviario.

Per definire l'andamento dei cedimenti nel tempo viene omesso nell'analisi il sovraccarico da traffico ferroviario in accordo a quanto specificato in Doc. Rif. [5].

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- generazione dello stato tensionale iniziale geostatico;
- costruzione del rilevato esistente per una durata di 6 mesi;
- costruzione dell'armamento ferroviario sul rilevato esistente per una durata di 30 giorni;
- consolidazione del rilevato esistente per una durata di 50 anni;
- azzeramento dei cedimenti dovuti al rilevato esistente e costruzione del rilevato di progetto per una durata di 6 mesi;
- costruzione dell'armamento ferroviario sul rilevato di progetto per una durata di 30 giorni e successiva consolidazione di 11 mesi fino alla messa in opera del rilevato;
- consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio della linea ferroviaria per una durata di 6 mesi, 1 anno, 3 anni, 20 anni e 75 anni.

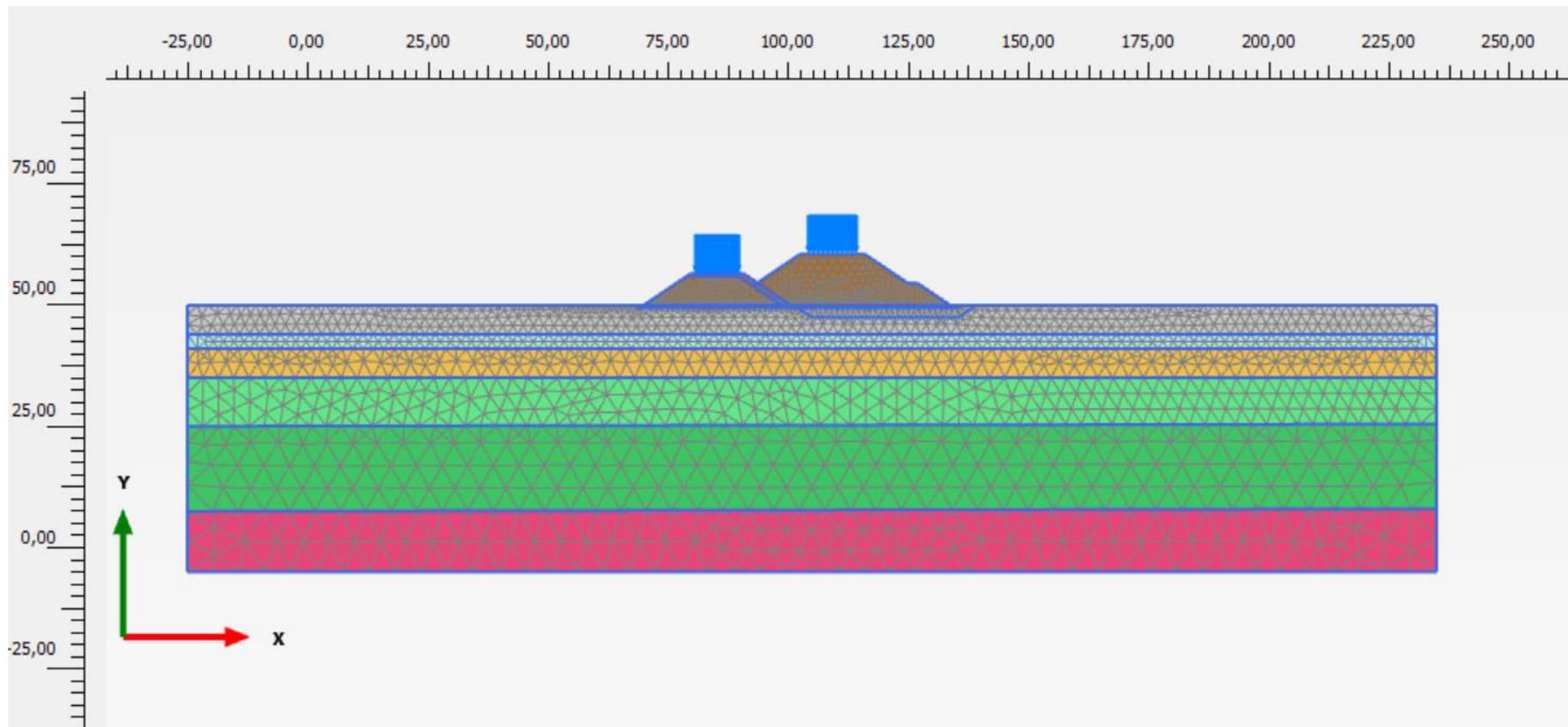


Figura 12.7: Modello Rilevato, sez. 67+150

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>73 di 87</b>

#### 12.4.2 Risultati

Con riferimento a Manuale di Progettazione RFI DINIC MA CS 00 001 C (parte IV), è necessario garantire il rispetto dei seguenti criteri di ammissibilità:

- cedimento residuo (differenza tra cedimento di lungo termine e cedimento a fine costruzione rilevato) inferiore a 5cm;
- cedimento residuo inferiore al 10% del cedimento di lungo termine.

In Figura 12.8 e in Figura 12.9 è riportato lo spostamento verticale  $u_y$  rispettivamente in corrispondenza di una sezione verticale coincidente con l'asse ferroviario e di una sezione orizzontale alla base del rilevato al termine delle seguenti fasi:

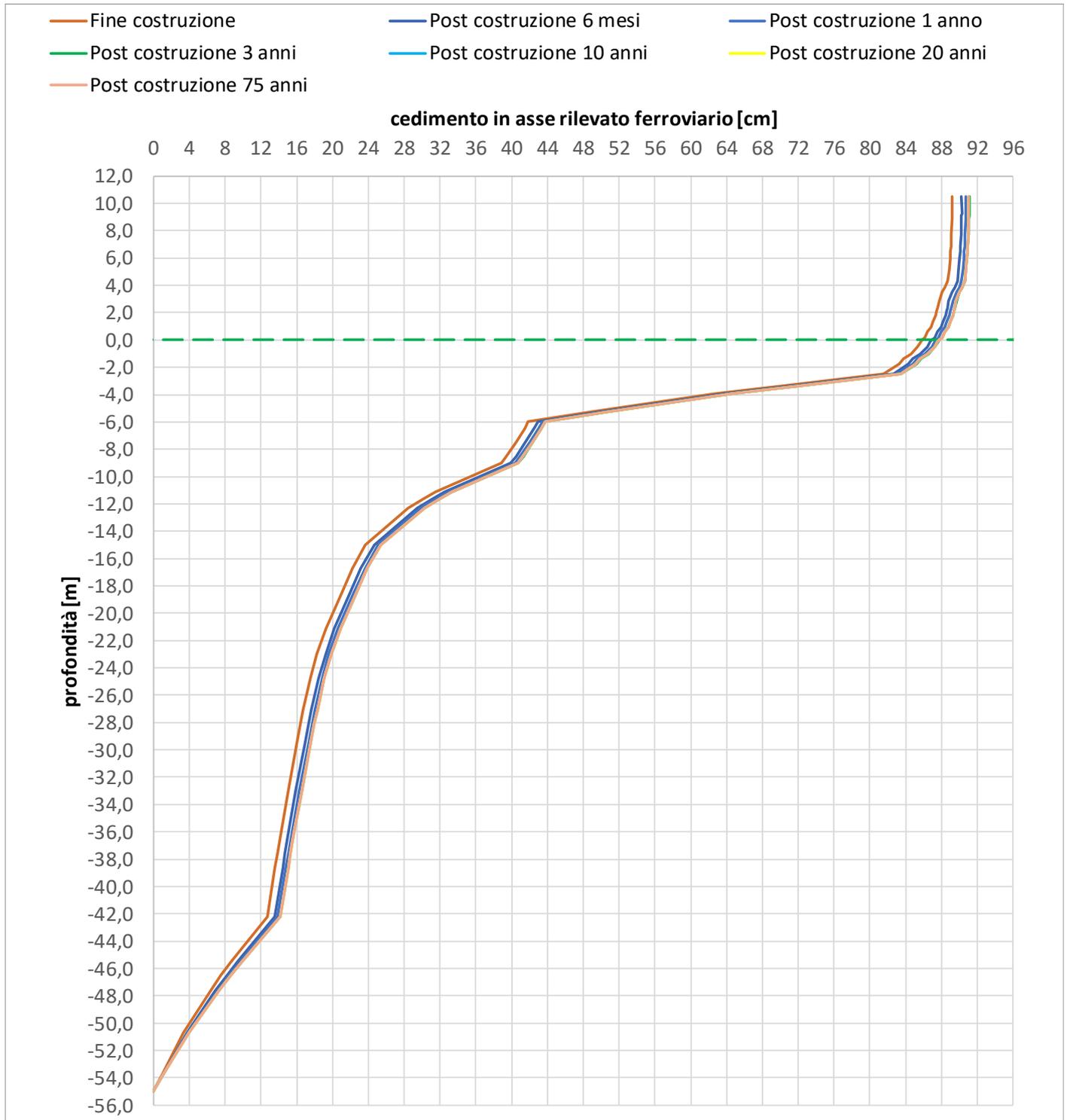
- al termine di tutte le fasi di costruzione del rilevato e messa in opera;
- dopo 6 mesi dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 1 anno dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 3 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 10 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 20 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 75 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria.

Come è possibile osservare in Figura 12.8 e Figura 12.9, dopo 6 mesi dal termine della costruzione il cedimento è prossimo al cedimento a lungo termine (75 anni), stato in cui c'è totale dissipazione delle sovrappressioni interstiziali indotte dal carico.

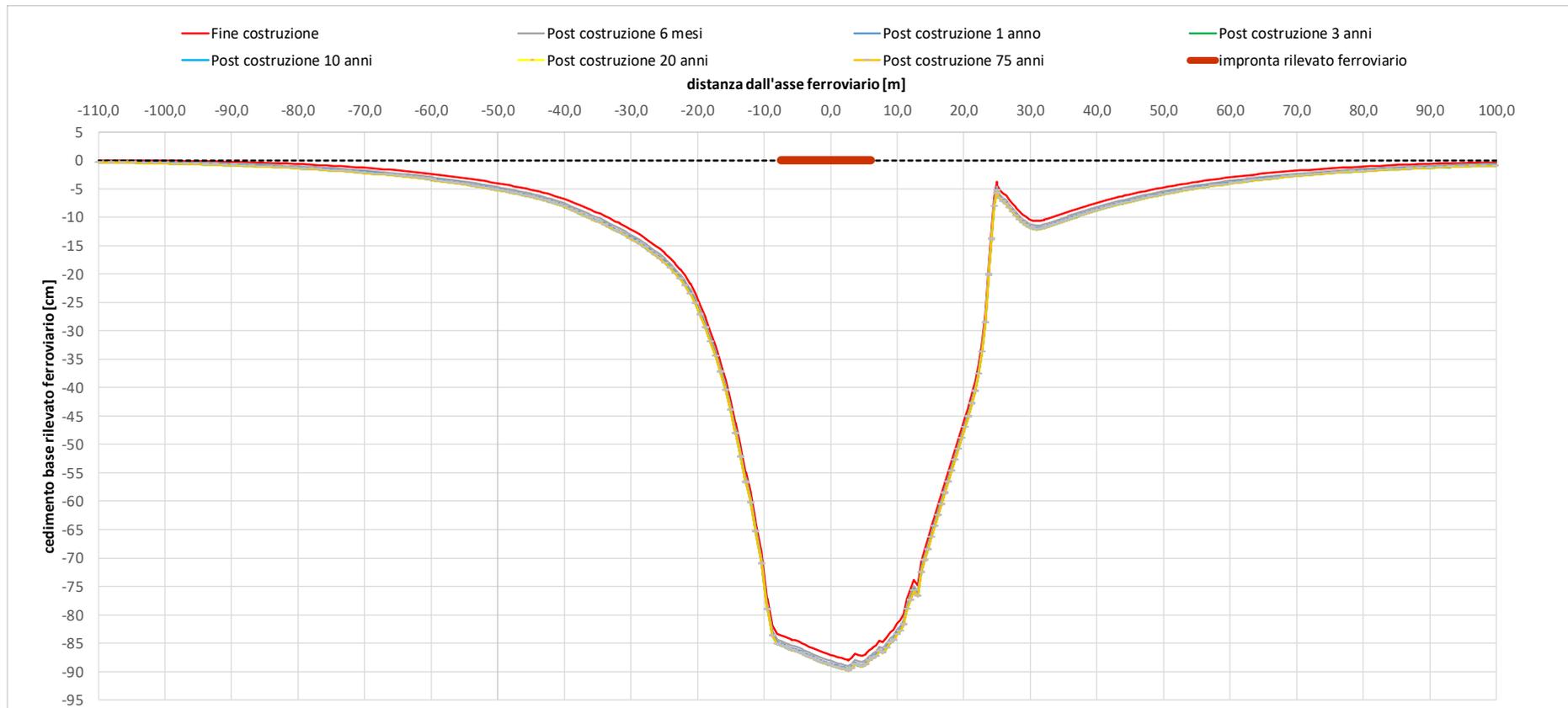
Risulta che al termine della costruzione il cedimento è pari a 89.2cm, mentre il cedimento dopo 75 anni è pari a 91.1cm. Ne consegue che i cedimenti residui sono pari a 1.9 cm, inferiori al valore limite di 5cm e inferiori al 10% dei cedimenti teorici di lungo termine.

In Figura 12.10, Figura 12.11, Figura 12.12 e Figura 12.13 sono riportati i cedimenti a fine costruzione e a lungo termine e le sovrappressioni in eccesso per le stesse fasi di calcolo.

Alla luce di tali risultati, con i tempi di realizzazione sopra previsti, si ritiene che i cedimenti calcolati rispettino i criteri di ammissibilità sopra riportati.



**Figura 12.8: Rilevato sez. 58+075 – Spostamenti verticali in corrispondenza dell'asse ferroviario**



**Figura 12.9: Rilevato sez.58+075 – Spostamenti verticali in corrispondenza della base del rilevato ferroviario**

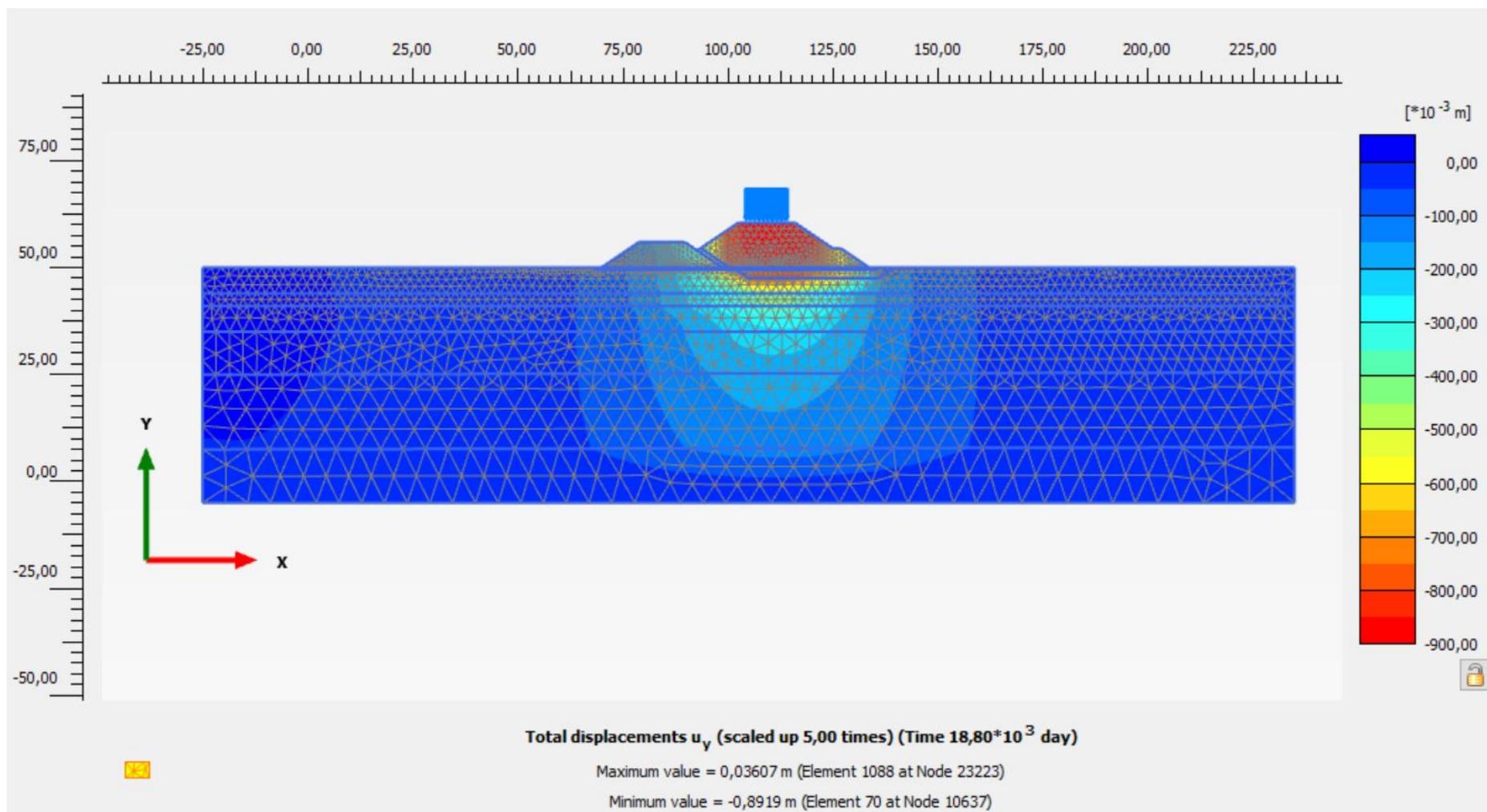


Figura 12.10: Rilevato sez. 67+150 – Spostamenti verticali termine costruzione

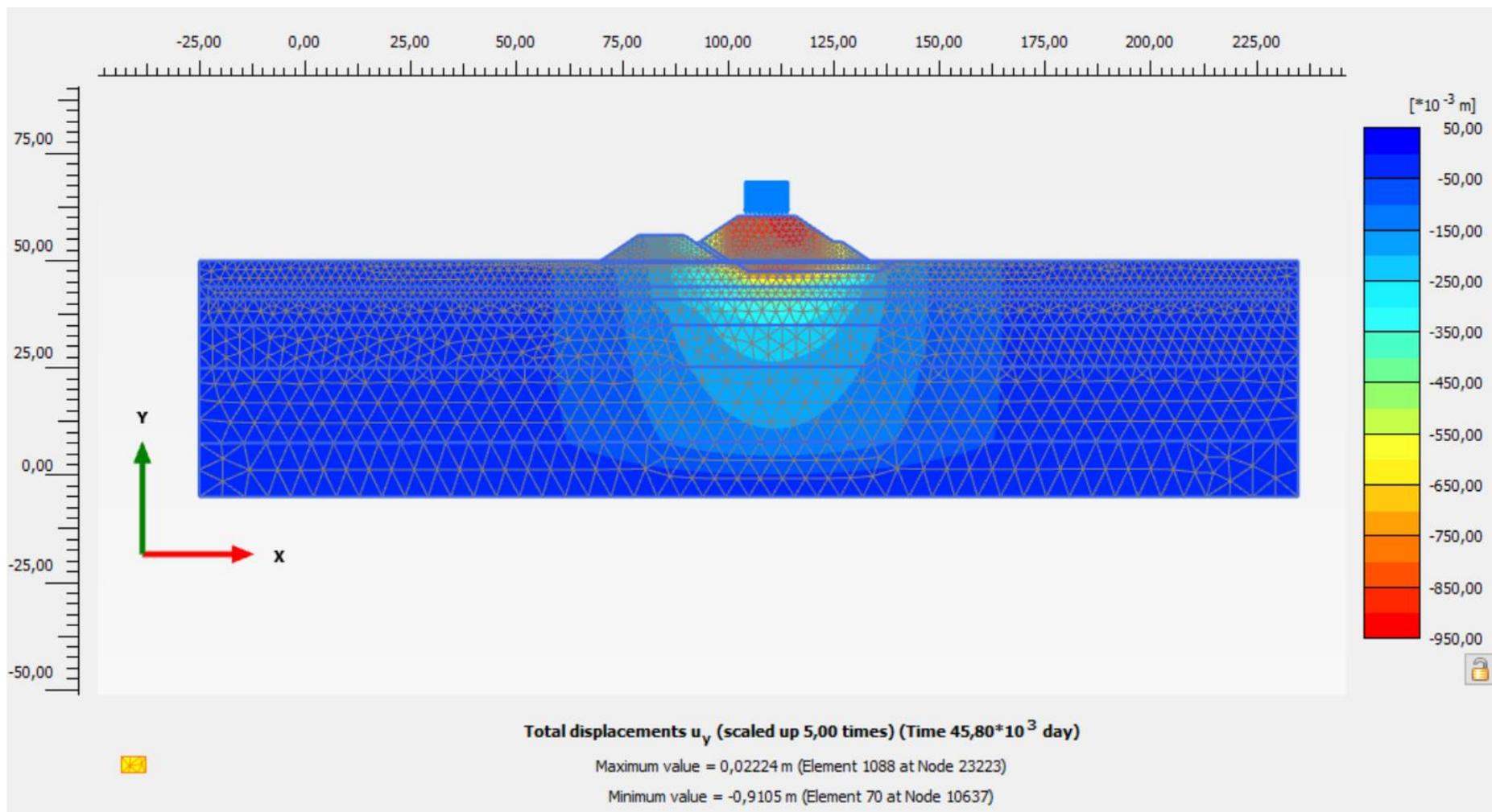


Figura 12.11: Rilevato sez. 67+150 – Spostamenti verticali lungo termine

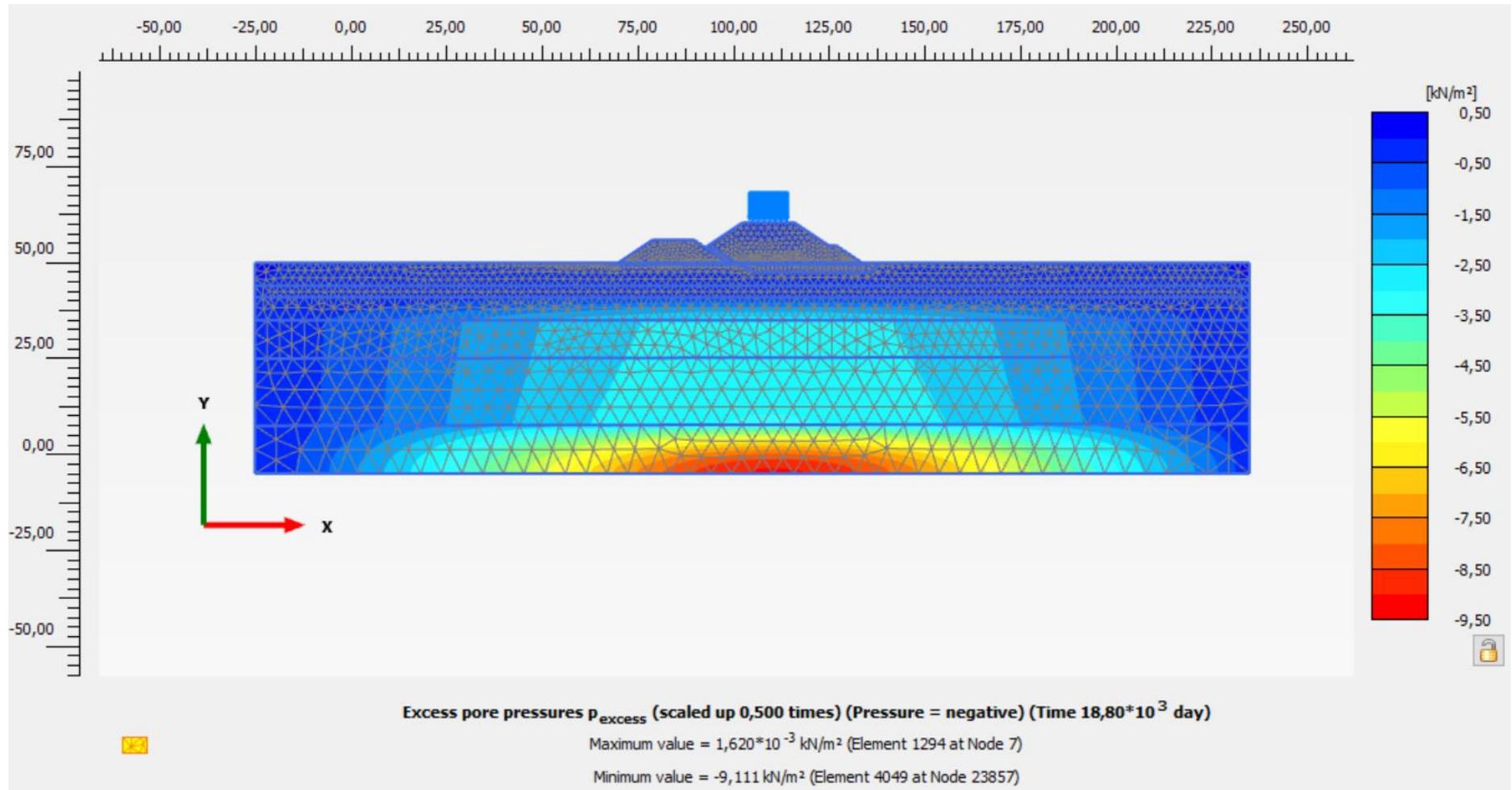


Figura 12.12: Rilevato sez. 67+150 – Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  termine costruzione

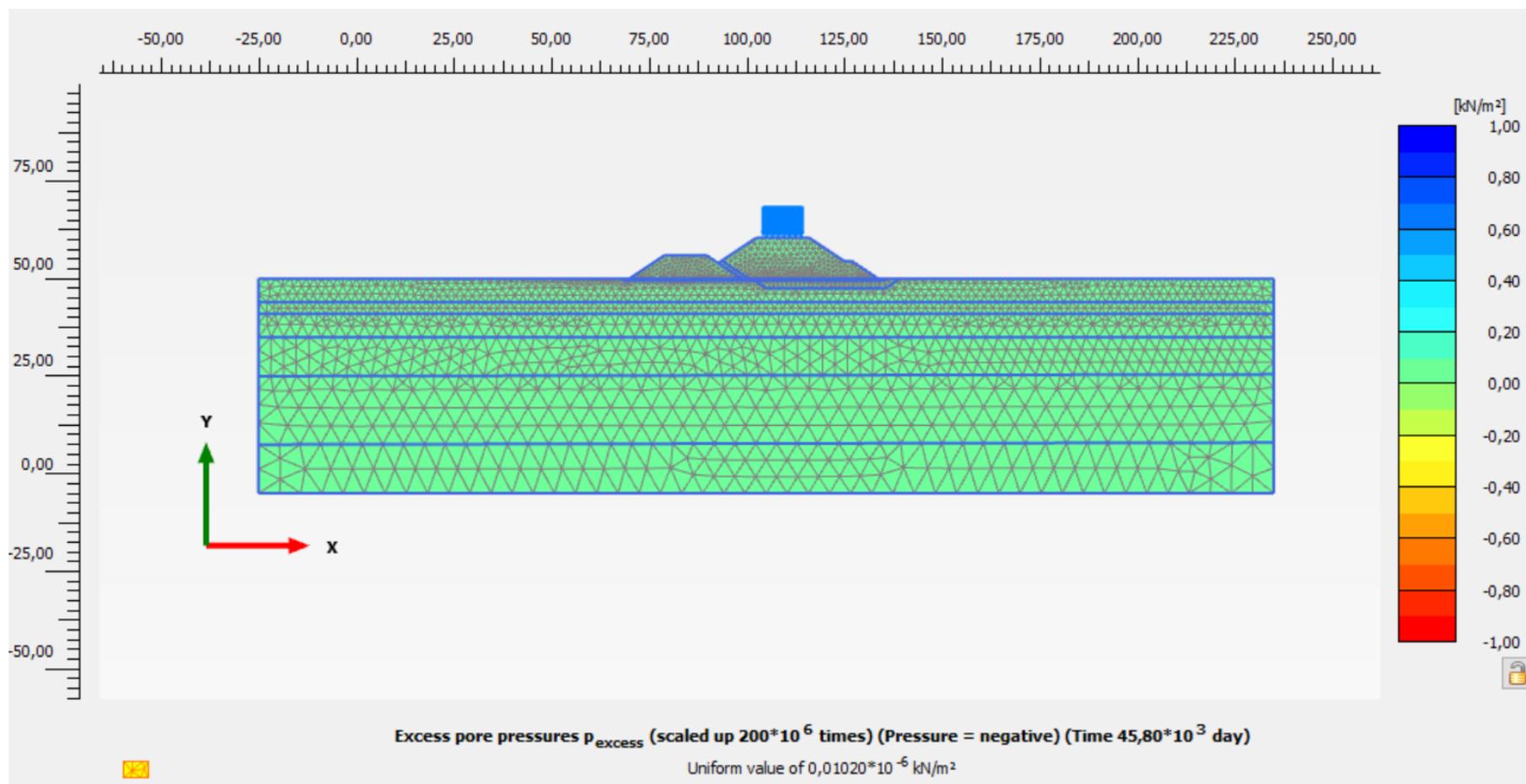


Figura 12.13: Rilevato sez. 67+150 – Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  lungo termine.

### 13. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 63+250

#### 13.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

La sezione in esame alla progressiva 63+250 è in trincea ed ha una profondità di scavo pari a circa 3.2 metri. La trincea è un allargamento di quella esistente per permettere il raddoppio della linea ferroviaria. In accordo a quanto riportato nella Relazione Geotecnica generale (Doc. Rif. [1]) e sulla base di quanto descritto nel capitolo 5., nella Tabella 13.1 e Tabella 13.2 sono riportati la stratigrafia ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto fattorizzati utilizzando i coefficienti M2 riportati nella Tabella 5.4 della presente relazione.

Si rimanda invece alla Tabella 8.1 per i valori dei parametri geotecnici relativi ai materiali antropici utilizzati per il corpo del rilevato e per lo strato di scotico (50 cm al di sotto del rilevato).

Si ricorda che, come definito al capitolo 7 del Doc. Rif. [3], le verifiche geotecniche SLU di stabilità globale delle scarpate, in campo statico, richiedono l'adozione della sola Combinazione 2 dell'Approccio 1 e pertanto l'applicazione dei soli coefficienti parziali M2, mentre per le verifiche sismiche e per le verifiche SLE, finalizzate alla determinazione dei cedimenti, sono richiesti i parametri caratteristici.

**Tabella 13.1: Stratigrafia di calcolo per la sezione 63+250**

<b>Strato</b>	<b>Profondità da [m da p.c.]</b>	<b>Profondità a [m da p.c.]</b>	<b>Descrizione</b>
WRs1	0.0	4.0	Sabbia da limosa a con limo, localmente debolmente argillosa e/o ghiaiosa e/o con clasti.
WRa2	4.0	6.0	Argilla limosa sabbiosa e/o limo argilloso sabbioso e/o argilla con sabbia con possibili livelli centimetrici di presenza organica.
WRs2	6.0	12.0	Sabbia limosa, da debolmente argillosa ad argillosa.

**Tabella 13.2: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 63+250 – Materiali in sito**

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Resistenza al taglio non drenata	
	$\gamma_d$	$\phi'_k$	$\phi'_d M2$	$c'_k$	$c'_d M2$	$c_u$	$c_u M2$
	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
WRs1	19	33	27.4	0	0	-	-
WRa2	19	25	20.5	0	0	60	42.9
WRs2	19	33	27.4	0	0	-	-

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli a quota circa +26 m slmm ovvero circa 0.5 metri dal piano campagna in corrispondenza della trincea esistente.

### 13.2 CARICHI DI PROGETTO

Come anticipato nel paragrafo 8.4.2 il carico da traffico ferroviario ( $q$ ) e l'armamento ferroviario sono stati trascurati per questa verifica.

È stato invece considerato un carico variabile pari a 10kPa a monte della scarpata, ad una distanza di 1 metro dal ciglio della scarpata e distribuito per una lunghezza di 4 metri. Tale carico, in accordo alle NTC2018, nelle verifiche statiche è stato moltiplicato per un coefficiente  $\gamma_Q=1.5$  e nelle verifiche sismiche è stato preso con il suo valore caratteristico. Il valore dell'azione di calcolo risulta quindi pari a 15kPa nelle verifiche statiche e pari a 10 kPa nelle verifiche in condizioni sismiche.

Nelle verifiche SLU in condizioni sismiche, in accordo a quanto riportato nel capitolo 6, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$$K_H = + 0.052 \quad (\text{concorde alla direzione di scivolamento})$$

$$K_V = \pm 0.026 \quad (\text{verificando la più cautelativa tra negativo e positivo})$$

La condizione più cautelativa risulta essere rappresentata da  $K_V = -0.026$ .

### 13.3 VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE

Le verifiche SLU della stabilità globale (sia in condizioni statiche che sismiche) sono state condotte tramite il codice di calcolo Slope/W (Doc. Rif. [13]). Le combinazioni di carico adottate nelle analisi fanno riferimento rispettivamente ai coefficienti parziali (A2+M2) per le analisi in campo statico e ai valori caratteristici per le analisi sismiche.

	<b>RADDOPPIO LINEA CODOGNO – CREMONA – MANTOVA</b> <b>TRATTA PIADENA - MANTOVA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 001</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>82 di 87</b>

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico ferroviario. Tra esse, è definita critica quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo. Come da NTC 2018, la verifica SLU di stabilità globale risulta soddisfatta quando la superficie di scivolamento più critica, tra tutte quelle cinematicamente possibili, ha un fattore di sicurezza pari almeno ad 1.1 in condizioni statiche e pari almeno a 1.2 in condizioni sismiche, ossia risultino soddisfatte le seguenti disuguaglianze:

- analisi statica:  $R/E_d \geq \gamma_R$  con  $\gamma_R=1.1$
- analisi sismica:  $R/E_d \geq \gamma_R$  con  $\gamma_R=1.2$

essendo:

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

$R_d$  =  $R/\gamma_R$  valore di progetto della resistenza.

Nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore minore di 1 metro, considerate corticali e non rappresentative della situazione reale in quanto la scarpata della trincea verrà rifinita con la copertura a verde.

### 13.3.1 Risultati

I risultati ottenuti nelle analisi di stabilità globale sono riportati in Tabella 13.3 insieme alle figure di riferimento. Dove le verifiche non risultano soddisfatte, è stato rappresentato l'inviluppo di tutte le superfici di scorrimento con fattore di sicurezza inferiore a quello richiesto dalla normativa.

**Tabella 13.3: Risultati verifiche di stabilità globale per la sezione al km 63+250 – Scarpata 3H:2V**

ANALISI	$R/E_d$	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA	0.920	Figura 13.1
PSEUDOSTATICA	1.034	Figura 13.2

Le verifiche di stabilità globale in campo statico e sismico non risultano soddisfatte. Si è pertanto abbattuta la pendenza delle scarpate fino ad ottenere il raggiungimento del fattore di sicurezza richiesto dalla normativa vigente. Le verifiche risultano soddisfatte con scarpate con pendenza 2H:1V. I risultati ottenuti nelle analisi di stabilità globale sono riportati in Tabella 13.4 insieme alle figure di riferimento.

**Tabella 13.4: Risultati verifiche di stabilità globale per la sezione al km 63+250 – Scarpata 2H:1V**

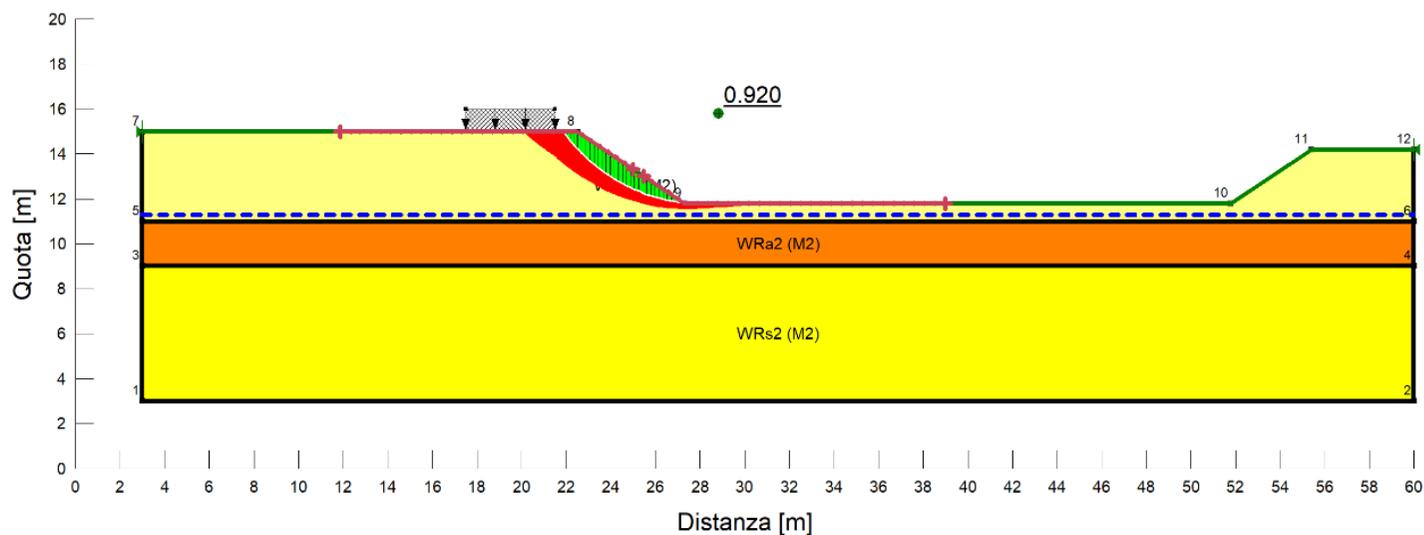
ANALISI	R/E <sub>d</sub>	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA	1.164	Figura 13.3
PSEUDOSTATICA	1.269	Figura 13.4

ANALISI STATICA PENDENZA 3:2  
Trincea km 63+250  
kh:0  
kv:0  
Sovraccarico Laterale (kN/m<sup>3</sup>): 15 kN/m<sup>3</sup>

Name: WRs1 (M2)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 27.45 °

Name: WRa2 (M2)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 20.46 °

Name: WRs2 (M2)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 27.45 °



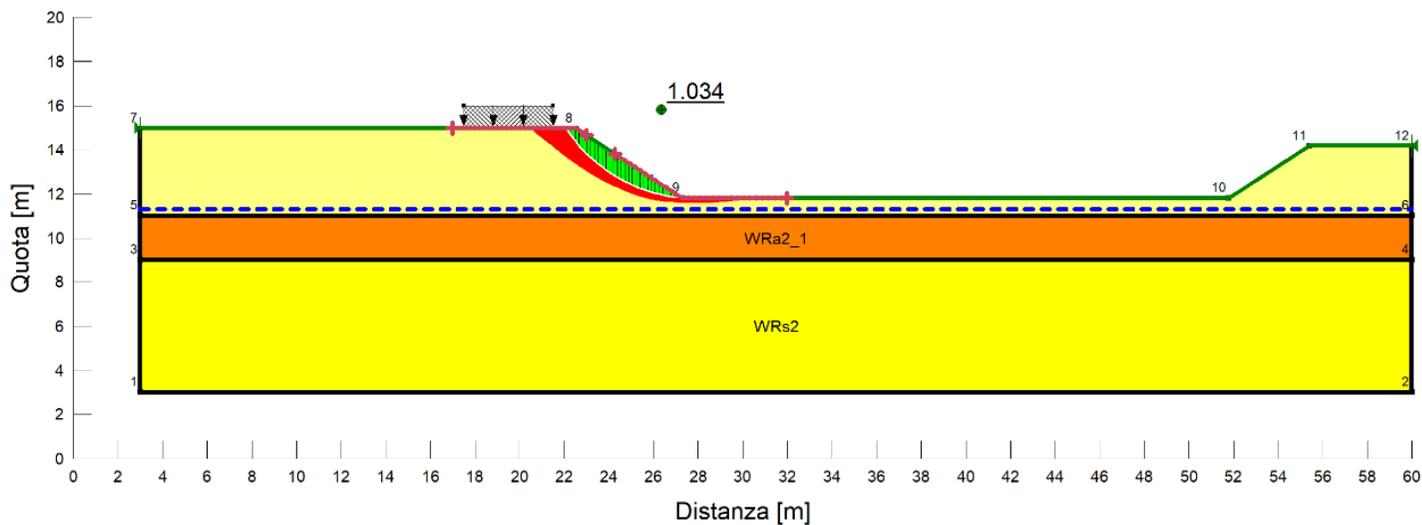
**Figura 13.1: Trincea, sez.63+250 - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2 – Pendenza scarpata 3:2**

ANALISI PSEUDOSTATICA PENDENZA 3:2  
Trincea km 63+250  
kh: 0.052  
kv: -0.026  
Sovraccarico Laterale (kN/m<sup>3</sup>): 10 kN/m<sup>3</sup>

Name: WRs1  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °

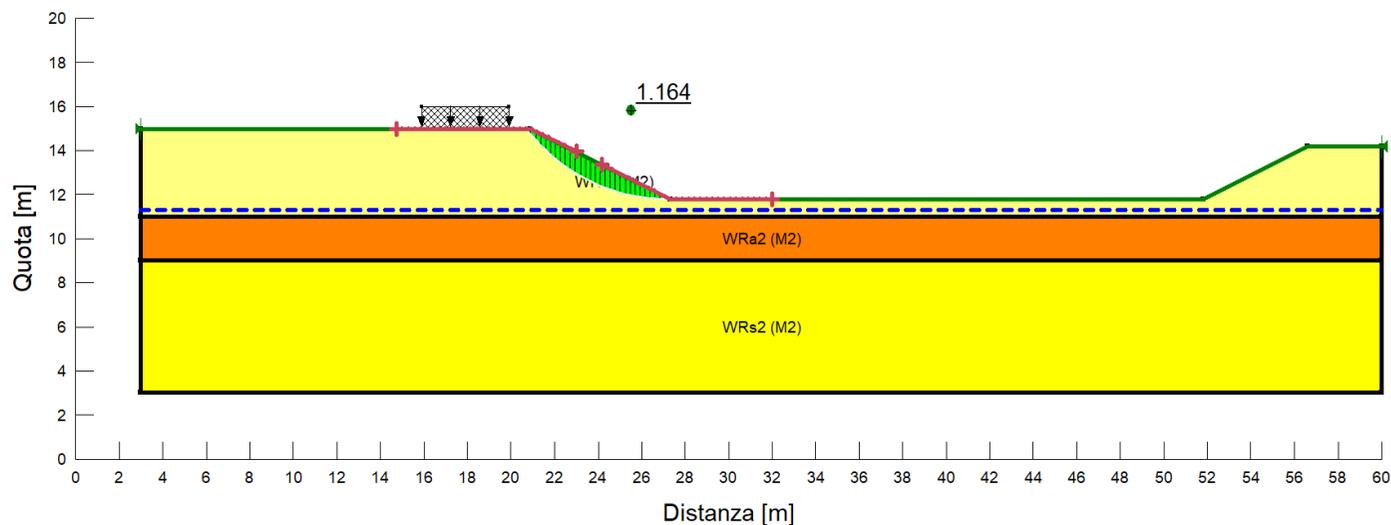
Name: WRa2\_1  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 60 kPa

Name: WRs2  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °



**Figura 13.2: Trincea, sez.63+250 - Analisi di stabilità globale in campo sismico – Pendenza scarpata 3:2**

ANALISI STATICA PENDENZA 2:1  
Trincea km 63+250  
kh:0  
kv:0  
Sovraccarico Laterale (kN/m<sup>3</sup>): 15 kN/m<sup>3</sup>



Name: WRs1 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 27.45 °

Name: WRa2 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 20.46 °

Name: WRs2 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 27.45 °

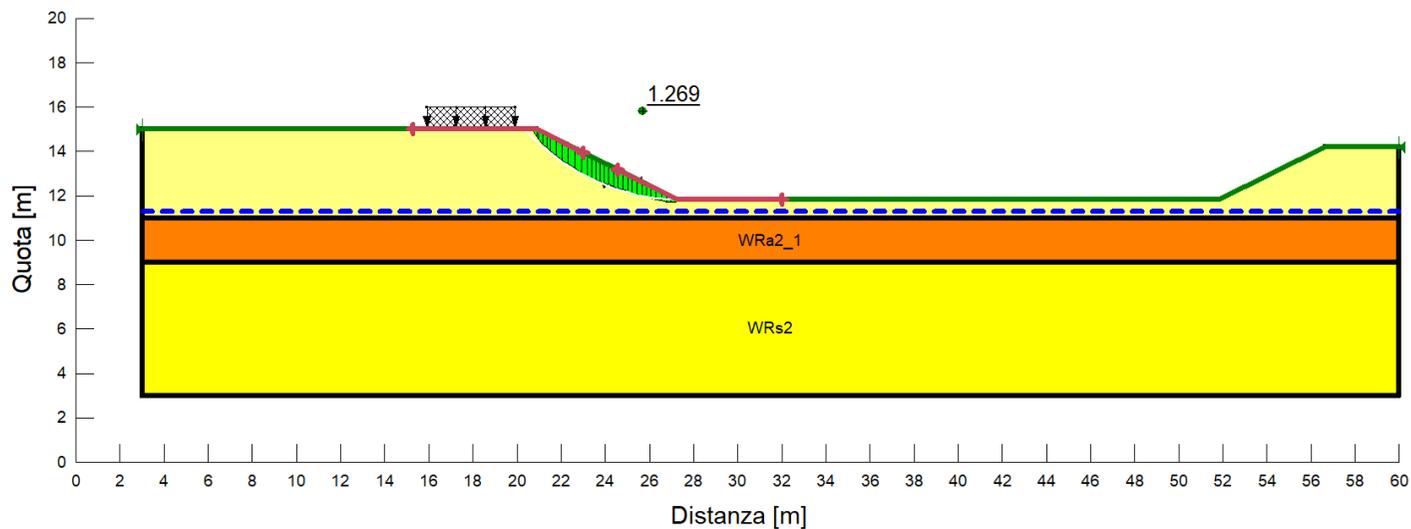
**Figura 13.3: Trincea, sez.63+250 - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2 – Pendenza scarpata 2:1**

ANALISI PSEUDOSTATICA PENDENZA 2:1  
Trincea km 63+250  
kh: 0.052  
kv: -0.026  
Sovraccarico Laterale (kN/m<sup>3</sup>): 10 kN/m<sup>3</sup>

Name: WRs1  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °

Name: WRa2\_1  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 60 kPa

Name: WRs2  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °



**Figura 13.4: Trincea, sez.63+250 - Analisi di stabilità globale in campo sismico – Pendenza scarpata 2:1**