

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP: J84H17000930009

**U.O. INFRASTRUTTURE NORD**

**PROGETTO DEFINITIVO**

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

**GEOTECNICA**

Relazione di calcolo rilevati stradali

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 2    A

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



File: NM2503D26CLRI0000002A.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. CRITERI DI VERIFICA IN ACCORDO ALLE NTC2018.....</b>	<b>10</b>
4.1 GENERALE.....	10
4.2 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI.....	11
4.2.1 Verifiche Stati Limite Ultimi (SLU).....	11
4.2.2 Verifiche Stati limite di esercizio (SLE).....	13
4.3 STABILITÀ DEL SITO NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE.....	14
4.4 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI.....	15
4.4.1 Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche.....	15
4.4.2 Verifiche Stati limite ultimi (SLU).....	16
4.4.3 Stati limite di esercizio (SLE).....	17
<b>5. COEFFICIENTI SISMICI PER LE VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE.....</b>	<b>18</b>
<b>6. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA.....</b>	<b>20</b>
6.1 CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI.....	20
6.1.1 Slope/W.....	20
6.1.2 Plaxis 2D.....	20
6.2 METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE.....	21
6.2.1 Verifiche di stabilità.....	21
6.2.2 Valutazione degli spostamenti.....	21

<b>7. CARATTERISTICHE DEL CORPO STRADALE.....</b>	<b>22</b>
7.1 GEOMETRIA DEI RILEVATI STRADALI .....	22
7.2 MATERIALI E PARAMETRI GEOTECNICI COSTITUENTI IL RILEVATO .....	22
7.3 CARICHI DI PROGETTO .....	22
7.3.1 Carichi stradali per le Verifiche SLU .....	23
7.3.2 Carichi stradali per le Verifiche SLE .....	23
<b>8. SELEZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO.....</b>	<b>24</b>
<b>9. SEZIONE DI CALCOLO RILEVATO DI APPROCCIO ALL'OPERA NV24 (KM 64+080 CA.) .....</b>	<b>25</b>
9.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO .....	25
9.2 CARICHI DI PROGETTO .....	26
9.3 VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE .....	26
9.3.1 Risultati .....	27
9.4 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI .....	35
9.4.1 Modelli e fasi di calcolo .....	35
9.4.2 Risultati .....	37
<b>10. SEZIONE DI CALCOLO RILEVATO DI APPROCCIO ALL'OPERA NV24 (KM 65+364 CA.) .....</b>	<b>44</b>
10.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO .....	44
10.2 CARICHI DI PROGETTO .....	45
10.3 VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE .....	45
10.3.1 Risultati .....	46
10.4 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI .....	54
10.4.1 Modelli e fasi di calcolo .....	54
10.4.2 Risultati .....	56
<b>11. SEZIONE DI CALCOLO RILEVATO DI APPROCCIO ALL'OPERA NV34 (KM 87+685 CA.) .....</b>	<b>63</b>
11.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO .....	63
11.2 CARICHI DI PROGETTO .....	64

11.3	VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE .....	64
11.3.1	<i>Risultati</i> .....	65
11.4	VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI .....	68
11.4.1	<i>Modelli e fasi di calcolo</i> .....	68
11.4.2	<i>Risultati</i> .....	70

	<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 002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>5 di 77</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.

 <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 002</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 7 di 77</p>

## 2. INTRODUZIONE

Il presente documento riporta le verifiche geotecniche, ai sensi della Normativa vigente (NTC 2018), relative alle sezioni caratteristiche dei rilevati stradali nell'ambito del Progetto Definitivo del raddoppio ferroviario della tratta Piadena – Mantova, definita Lotto 3 e facente parte del Progetto Definitivo del raddoppio della tratta Codogno – Cremona – Mantova.

La relazione si articola come segue:

- il capitolo 3 elenca i documenti, le normative e la bibliografia di riferimento;
- il capitolo 4 riporta i criteri generali di progettazione in accordo alla Normativa vigente (NTC 2018);
- il capitolo 5 contiene la definizione dell'azione sismica di progetto da utilizzare nelle verifiche;
- il capitolo 6 riporta una breve descrizione dei codici di calcolo utilizzati per le verifiche effettuate;
- il capitolo 7 riporta la descrizione del corpo stradale in esame da un punto di vista geometrico, le caratteristiche geotecniche dei materiali costituenti il rilevato e i sovraccarichi considerati;
- il capitolo 8 riporta una breve descrizione delle sezioni analizzate;
- i capitoli 9, 10 e 11 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 002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>8 di 77</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] 2008/217/CE - “Specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema «infrastruttura» del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità (20/12/2007)”.



 <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 002</td> <td>A</td> <td>9 di 77</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	NM25	03 D 26	CL	RI0000 002	A	9 di 77
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
NM25	03 D 26	CL	RI0000 002	A	9 di 77								

[11] 2011/275/CE - “Specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema «infrastruttura» del sistema ferroviario transeuropeo convenzionale (26/04/2011)”.

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

[13] UNI EN 1997-1 : Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali

[14] 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

[15] Slope\W – GeoSlope ([www.geo-slope.com](http://www.geo-slope.com))

[16] 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>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 002	REV. A	FOGLIO 10 di 77

## 4. CRITERI DI VERIFICA IN ACCORDO ALLE NTC2018

### 4.1 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 002	REV. A	FOGLIO 11 di 77

## 4.2 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.

### 4.2.1 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 4.1, Tabella 4.4 e Tabella 4.5 (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 ( $R = R \left[ \gamma_F \cdot F_k \cdot \frac{X_k}{\gamma_m} ; a_d \right]$ ).

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 4.1 (Tab. 6.2.I del Doc. Rif. [3]) e i coefficienti di combinazione  $\psi$  definiti in Tabella 4.2 e Tabella 4.3 (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</b> <b>FERROVIARI</b>	COMMESSA NM25	LOTTO 03 D 26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0000 002	REV. A

**Tabella 4.1: 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 4.1 (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 4.2: 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
	$gr_1$	0,80 <sup>(2)</sup>	0,80 <sup>(1)</sup>	0,0
Gruppi di	$gr_2$	0,80 <sup>(2)</sup>	0,80 <sup>(1)</sup>	-
carico	$gr_3$	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	in fase di esecuzione	0,80	0,0	0,0
neve	SLU e SLE	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 002</b>	REV. <b>A</b>

**Tabella 4.3: 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>	(1)	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	(2) (3)	(2)	(2)
	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 4.4: 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
Coesione 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	$\gamma_\gamma$	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0

**Tabella 4.5: 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

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

	<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 002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>14 di 77</b>

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

#### 4.3 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 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.

	<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 002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>15 di 77</b>

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

##### 4.4.1 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 rigidità 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 4.6 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</b> <b>FERROVIARI</b>	COMMESSA NM25	LOTTO 03 D 26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0000 002	REV. A	FOGLIO 16 di 77

**Tabella 4.6: 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.

#### **4.4.2 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).



 <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 002	REV. A	FOGLIO 17 di 77

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 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.

#### **4.4.3 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>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 002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>18 di 77</b>

## 5. 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]);

$\beta_s$  = 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, e sulla base di quanto riportato nella Relazione geotecnica generale (Doc. Rif. [1]), si ottengono i seguenti coefficienti per la verifica di stabilità globale allo SLV per tutti i Cavalcaferrovia previsti per la tratta oggetto del presente studio.

**Tabella 5.1: Valori dei coefficienti sismici per le verifiche di stabilità globale**

Opera:	Cat. Suolo	V <sub>N</sub> (anni)	Classe d'uso	Coeff. d'uso	V <sub>R</sub> (anni)	T <sub>R</sub> (per SLV)	a <sub>g</sub> (g)	F <sub>o</sub> (-)	T*c (s)	S <sub>s</sub>	S <sub>s</sub>	S <sub>T</sub>	a <sub>max</sub> (g)	β <sub>s</sub>	kh	kv
NV22	C	50	III	1.5	75	712	0.095	2.600	0.315	1.552	1.5	1	<b>0.143</b>	0.38	0.054	±0.027
NV23	C	50	IV	2	100	949	0.105	2.592	0.318	1.537	1.5	1	<b>0.158</b>	0.38	0.060	±0.030
NV24	D	50	III	1.5	75	712	0.095	2.600	0.315	2.029	1.8	1	<b>0.171</b>	0.38	0.065	±0.032
NV25	C	50	IV	2	100	949	0.105	2.592	0.318	1.537	1.5	1	<b>0.157</b>	0.38	0.060	±0.030
NV26	C	50	III	1.5	75	712	0.095	2.600	0.315	1.552	1.5	1	<b>0.143</b>	0.38	0.054	±0.027
NV27	C	50	IV	2	100	949	0.105	2.592	0.318	1.537	1.5	1	<b>0.158</b>	0.38	0.060	±0.030
NV28	C	50	IV	2	100	949	0.112	2.579	0.309	1.527	1.5	1	<b>0.167</b>	0.38	0.064	±0.032
NV29	C	50	IV	2	100	949	0.112	2.579	0.309	1.527	1.5	1	<b>0.167</b>	0.38	0.064	±0.032
NV30	C	50	IV	2	100	949	0.112	2.579	0.309	1.527	1.5	1	<b>0.167</b>	0.38	0.064	±0.032
NV31	C	50	IV	2	100	949	0.112	2.579	0.309	1.527	1.5	1	<b>0.167</b>	0.38	0.064	±0.032
NV32	D	50	IV	2	100	949	0.116	2.565	0.306	1.955	1.8	1	<b>0.208</b>	0.38	0.079	±0.040
NV33	D	50	IV	2	100	949	0.116	2.565	0.306	1.955	1.8	1	<b>0.208</b>	0.38	0.079	±0.040
NV34	D	50	IV	2	100	949	0.116	2.565	0.306	1.955	1.8	1	<b>0.208</b>	0.38	0.079	±0.040

 <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 002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>20 di 77</b>

## 6. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA

### 6.1 CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI

#### 6.1.1 *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.

#### 6.1.2 *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 FERROVIARI</b>	COMMESSA <b>NM25</b>	LOTTO <b>03 D 26</b>	CODIFICA <b>CL</b>	DOCUMENTO <b>RI0000 002</b>	REV. <b>A</b>

## 6.2 METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE

### 6.2.1 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.

### 6.2.2 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 stradale.

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.

## 7. CARATTERISTICHE DEL CORPO STRADALE

### 7.1 GEOMETRIA DEI RILEVATI STRADALI

I rilevati stradali 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 previsto anche uno strato di bonifica di spessore definito a seguito delle verifiche effettuate. Le scarpate sono rifinite con una finitura a verde. Il rilevato è finito in sommità con la realizzazione di un pacchetto stradale.

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.

### 7.2 MATERIALI E PARAMETRI GEOTECNICI COSTITUENTI IL RILEVATO

Il materiale costituente il corpo del rilevato sarà materiale a grana grossa con i valori minimi dei parametri caratteristici riportati in Tabella 7.1.

**Tabella 7.1: 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	19	35	29.3	0	0	40	1x10 <sup>-5</sup>
STRATO DI SCOTICO	0.5	19	35	29.3	0	0	20	1x10 <sup>-5</sup>
EVENTUALE STRATO DI BONIFICA	Variabile	19	35	29.3	0	0	20	1x10 <sup>-5</sup>

### 7.3 CARICHI DI PROGETTO

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

- Sovraccarico stradale.
- Carico da azione sismica.

Il sovraccarico stradale è stato assunto pari a 20kPa applicato sulla sommità del rilevato, in corrispondenza della sede stradale, a partire da almeno 1m di distanza dal ciglio del rilevato.

Per la definizione dell'azione sismica di progetto si rimanda al capitolo 5 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 come previsti dalla Normativa vigente.

### **7.3.1 Carichi stradali per le Verifiche SLU**

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

- Il sovraccarico stradale è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 20.0kPa su una lunghezza di 8 metri. Tale carico è di tipo variabile sfavorevole pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 4.1, il valore di calcolo assunto risulta essere pari a:

$$q_d = q_k \times \gamma_{G1 [A2]} = 20 \text{ kPa} \times 1.3 = 26 \text{ kPa}$$

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

- Il sovraccarico stradale è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 20.0 kPa su una lunghezza di 8 metri. Tale sovraccarico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico moltiplicato per il coefficiente  $\psi_{2j}=0.2$ , relativo ai carichi dovuti al transito dei veicoli, in accordo a quanto specificato dalle Par.5.1.3.12 del Doc. Rif. [3]). Pertanto:

$$q_d = 0.2q_k = 4 \text{ kPa.}$$

### **7.3.2 Carichi stradali per le Verifiche SLE**

Nel calcolo dei cedimenti sono stati considerati i seguenti carichi

- Il sovraccarico stradale è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 20.0 kPa su una lunghezza di 8 metri Tale carico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico, pertanto:

$$q_d = q_k = 20 \text{ kPa.}$$

	<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 002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>24 di 77</b>

## 8. SELEZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO

Oggetto della presente relazione sono i rilevati stradali di approccio ai Cavalcaferrovia previsti nel 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).

In particolare, sono state individuate tre sezioni significative, per quanto riguarda le stratigrafie di calcolo e l'input sismico, per tener conto delle condizioni più critiche da un punto di vista delle verifiche di stabilità e di calcolo dei cedimenti attesi.

Le sezioni analizzate, tutte caratterizzate da una altezza del rilevato pari a 10m, sono le seguenti:

- Sezione al km 64+080 ca. in corrispondenza del rilevato di approccio al cavalcaferrovia NV24;
- Sezione al km 65+364 ca. in corrispondenza del rilevato di approccio al cavalcaferrovia NV25;
- Sezione al km 87+685 ca. in corrispondenza del rilevato di approccio al cavalcaferrovia NV34.

Per le sezioni sopra selezionate sono state svolte le verifiche di stabilità globale e le verifiche dei cedimenti.

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]).



## 9. SEZIONE DI CALCOLO RILEVATO DI APPROCCIO ALL'OPERA NV24 (KM 64+080 CA.)

### 9.1 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 4, nella Tabella 9.1 e nella Tabella 9.2 sono riportati rispettivamente la stratigrafia ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto.

Si rimanda invece alla Tabella 7.1 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 9.1: Rilevato di approccio NV24 - Stratigrafia di calcolo**

Strato	Profondità da [m da p.c.]	Profondità a [m da p.c.]	Descrizione
Wa1	0.0	3.0	Limo argilloso o con argilla, debolmente sabbioso o sabbioso e/o argilla limosa
Ws1	3.0	5.0	Sabbia da limosa a con limo, localmente argillosa
WRa2	5.0	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	11.0	Sabbia limosa, da debolmente argillosa ad argillosa
WRa2	11.0	17.0	Argilla limosa sabbiosa e/o limo argilloso sabbioso e/o argilla con sabbia con possibili livelli centimetrici di presenza organica
Rs1	17.0	21.0	Sabbia da debolmente limosa a limosa, localmente debolmente argillosa e/o limo sabbioso
Ra1	21.0	25.5	Limo sabbioso e/o argilla limosa debolmente sabbiosa
Rs2	25.5	50.0	Sabbia da debolmente limosa a limosa, localmente argillosa

 <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 002	REV. A	FOGLIO 26 di 77

**Tabella 9.2: Rilevato di approccio NV24 - Parametri geotecnici di calcolo – 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
	$\gamma_d$	$\phi'_k$	$\phi'_{dM2}$	$c'_k$	$c'_{dM2}$	$c_u$	$c_{uM2}$	$E_{op.}$	CR	RR	OCR	k
	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[m/s]
Wa1	19	25	20.5	0	0	35	25.0	-	0.18	0.036	3	1.0E-08
Ws1	19	33	27.5	0	0	-	-	13.7	-	-	-	2.0E-07
WRa2	19	25	20.5	0	0	50	35.7	-	0.16	0.032	2	1.0E-08
WRs2	19	32	26.6	0	0	-	-	17.5	-	-	-	5.0E-07
WRa2	19	25	20.5	0	0	60	42.9	-	0.16	0.032	2	1.0E-08
Rs1	19	33	27.5	0	0	-	-	25.0	-	-	-	5.0E-07
Ra1	19	24	19.6	0	0	70	50.0	-	0.18	0.036	1	1.0E-08
Rs2	19	34	28.3	0	0	-	-	37.5	-	-	-	1.0E-06

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli alla profondità di 1.0 m dal piano campagna.

## 9.2 CARICHI DI PROGETTO

Per il dettaglio del carico di progetto assunto per il sovraccarico stradale per le verifiche SLU e per le verifiche SLE si faccia riferimento a quanto riportato nel paragrafo 7.3.

Nelle verifiche SLU in condizioni sismiche, in accordo a quanto riportato nel capitolo 5, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$K_H = + 0.065$  (concorde alla direzione di scivolamento)

$K_V = \pm 0.032$  (verificando la più cautelativa tra negativo e positivo)

La condizione più cautelativa risulta essere rappresentata da  $K_V = -0.032$ .

## 9.3 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. [15]). 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.

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico stradale. 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

 <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 002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>27 di 77</b>

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.

### 9.3.1 Risultati

I risultati ottenuti nelle analisi di stabilità globale sono riportati in Tabella 9.3 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 9.3: Rilevato di approccio NV24 - Risultati verifiche di stabilità globale (analisi senza bonifica)**

ANALISI	$R/E_d$	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA	0.862	Figura 9.1
PSEUDOSTATICA	1.081	Figura 9.2

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 1.5 m (scotico + bonifica = 2 m). Il materiale sostituito è stato modellato con le stesse caratteristiche del materiale sostituito nello

	<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 002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>28 di 77</b>

scotico (si veda Tabella 7.1). I risultati ottenuti nelle analisi di stabilità globale sono riportati in Tabella 9.4 insieme alle figure di riferimento.

**Tabella 9.4: Rilevato di approccio NV24 - Risultati verifiche di stabilità globale con scotico + bonifica =2.0m**

ANALISI	R/E <sub>d</sub>	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA	1.170	Figura 9.3
PSEUDOSTATICA	1.219	Figura 9.4

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, lo strato di bonifica sarà necessario per altezze di rilevato > di 6.0 m. Per rilevati di altezza ≤ 6.0 m 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 altezza pari a 6.0 m sono riportati in Tabella 9.5 insieme alle figure di riferimento

**Tabella 9.5: Rilevato di approccio NV24 - H<sub>RIL</sub>=6.0 m - Risultati verifiche di stabilità globale**

ANALISI	R/E <sub>d</sub>	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA	1.101	Figura 9.5
PSEUDOSTATICA	1.584	Figura 9.6

**ANALISI STATICA**

Rilevato Stradale Cavalcaferrovia NV24 km 64+075.

kh: 0

kv: 0

Sovraccarico Stradale (kN/m<sup>3</sup>): 26 kN/m<sup>3</sup>

Name: Rilevato stradale (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 29.28 °

Name: Sottico (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 29.28 °

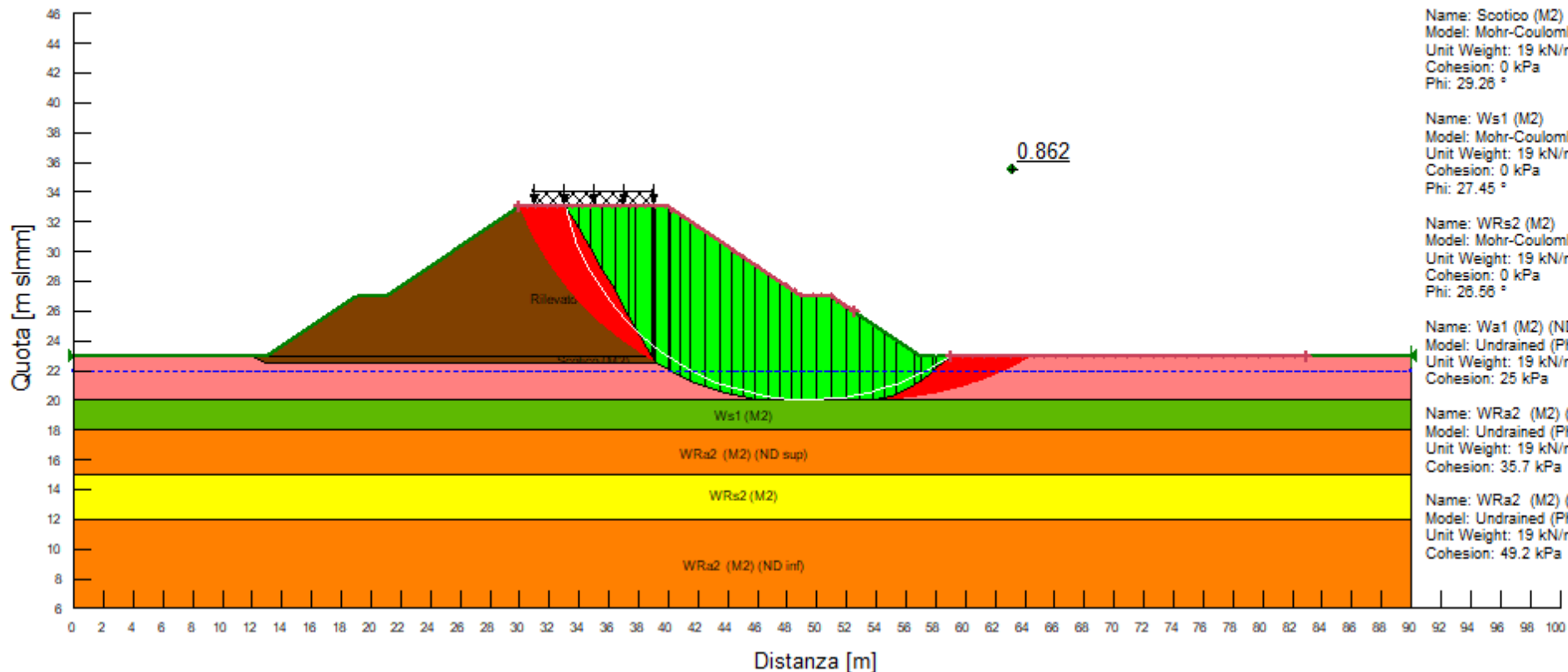
Name: Ws1 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 27.45 °

Name: WRs2 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 26.56 °

Name: Wa1 (M2) (ND)  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 25 kPa

Name: WRa2 (M2) (ND sup)  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 35.7 kPa

Name: WRa2 (M2) (ND inf)  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 49.2 kPa



**Figura 9.1: NV24 - Rilevato H=10 m - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2 senza strato di bonifica**

ANALISI PSEUDO-STATICA  
Rilevato Stradale Cavalcaferrovia NV24 km 64+075.  
kh: 0.065  
kv: -0.032  
Sovraccarico Stradale (kN/m<sup>3</sup>): 4 kN/m<sup>3</sup>

Name: Rilevato stradale  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 35 °

Name: Sottico  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 35 °

Name: Wa1  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 35 kPa

Name: Ws1  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °

Name: WRa2 sup  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 50 kPa

Name: WRa2 inf  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 80 kPa

Name: WRs2  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 32 °

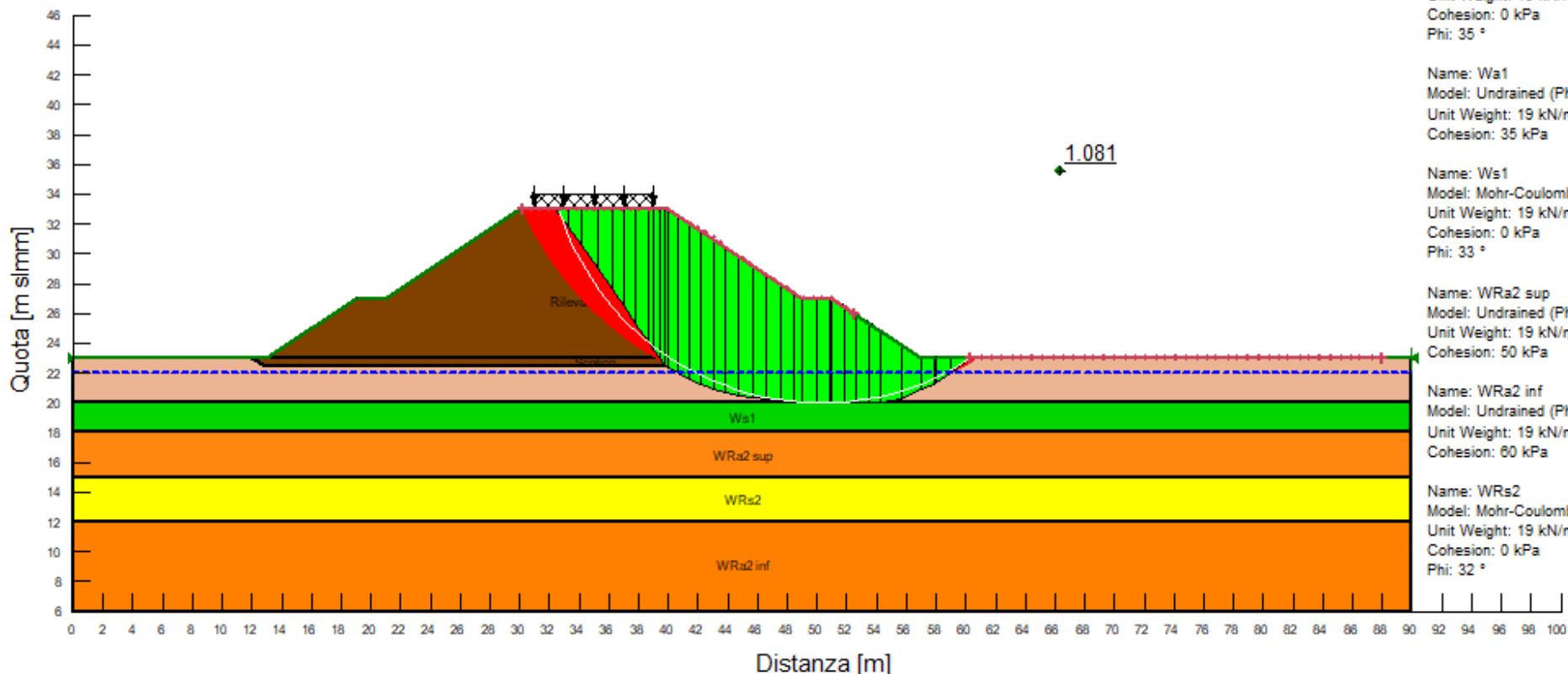


Figura 9.2: NV24 - Rilevato H=10 m - Analisi di stabilità globale in campo sismico senza strato di bonifica

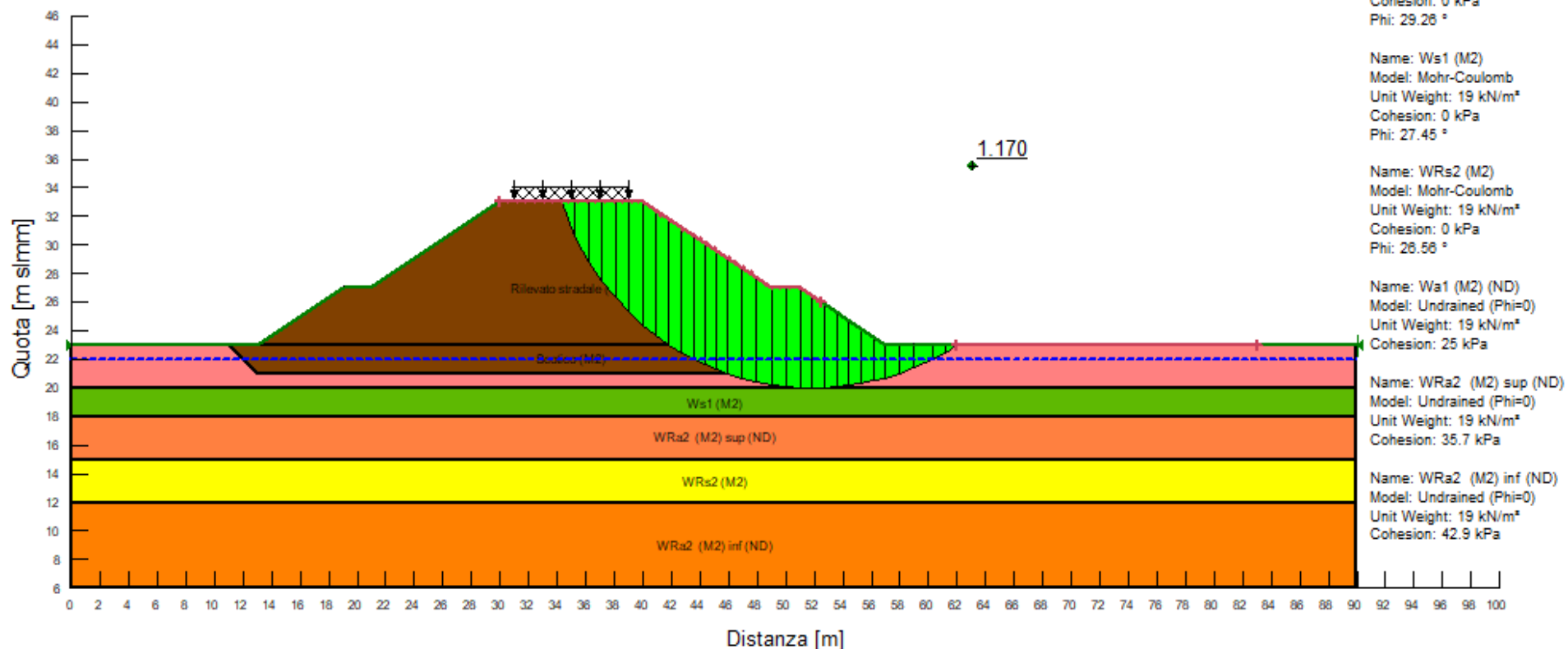
**ANALISI STATICA**

Rilevato Stradale Cavalcaferrovia NV24 km 64+075.

kh: 0

kv: 0

Sovraccarico Stradale (kN/m<sup>3</sup>): 26 kN/m<sup>3</sup>



**Figura 9.3: NV24 - Rilevato H=10 m - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2 con scotico + bonifica =2.0m**

**ANALISI PSEUDO-STATICA**

Rilevato Stradale Cavalcaferrovia NV24 km 64+075.

kh: 0.065

kv: -0.032

Sovraccarico Stradale (kN/m<sup>3</sup>): 4 kN/m<sup>3</sup>

Name: Rilevato stradale  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 35 °

Name: Scotico  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 35 °

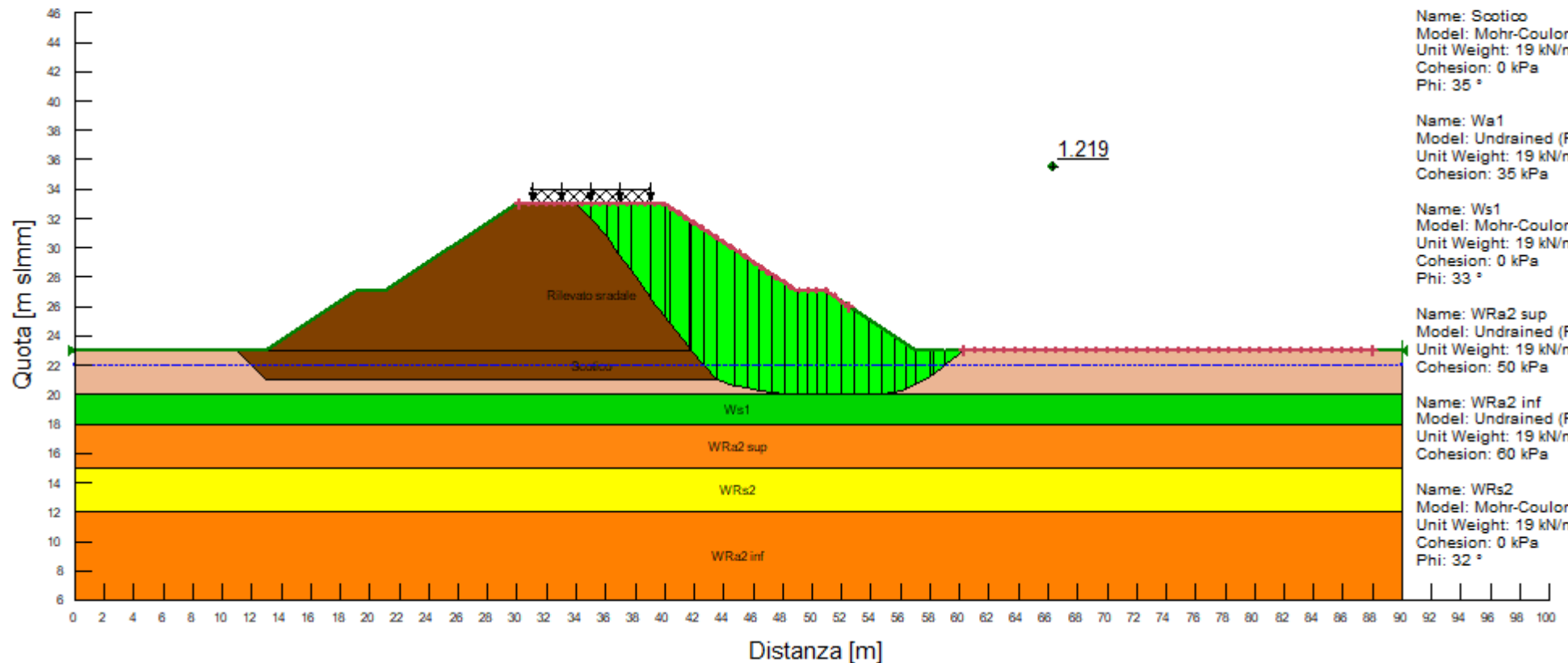
Name: Wa1  
Model: Undrained (Phi=  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 35 kPa

Name: Ws1  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °

Name: WRa2 sup  
Model: Undrained (Phi=  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 50 kPa

Name: WRa2 inf  
Model: Undrained (Phi=  
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: 32 °



**Figura 9.4: NV24 - Rilevato H=10 m - Analisi di stabilità globale in campo sismico con scotico + bonifica =2.0m**



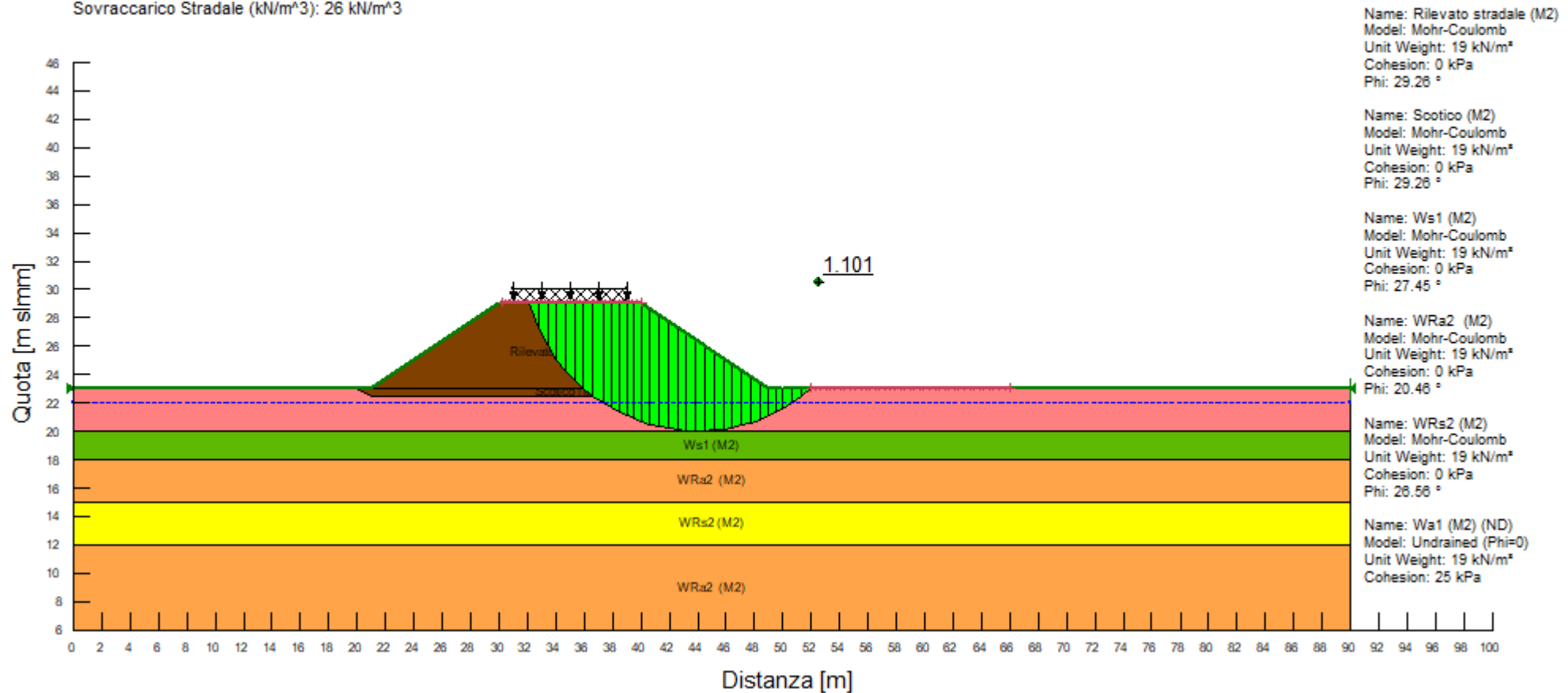
**ANALISI STATICA**

Rilevato Stradale Cavalcaferrovia NV24 km 64+075.

kh: 0

kv: 0

Sovraccarico Stradale (kN/m<sup>3</sup>): 26 kN/m<sup>3</sup>



**Figura 9.5: NV24 - Rilevato H=6 m - Analisi di stabilità globale in campo statico**

**ANALISI PSEUDO-STATICA**

Rilevato Stradale Cavalcaferrovia NV24 km 64+075.

kh: 0.065

kv: -0.032

Sovraccarico Stradale (kN/m<sup>3</sup>): 4 kN/m<sup>3</sup>

Name: Rilevato stradale  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 35 °

Name: Scotico  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 35 °

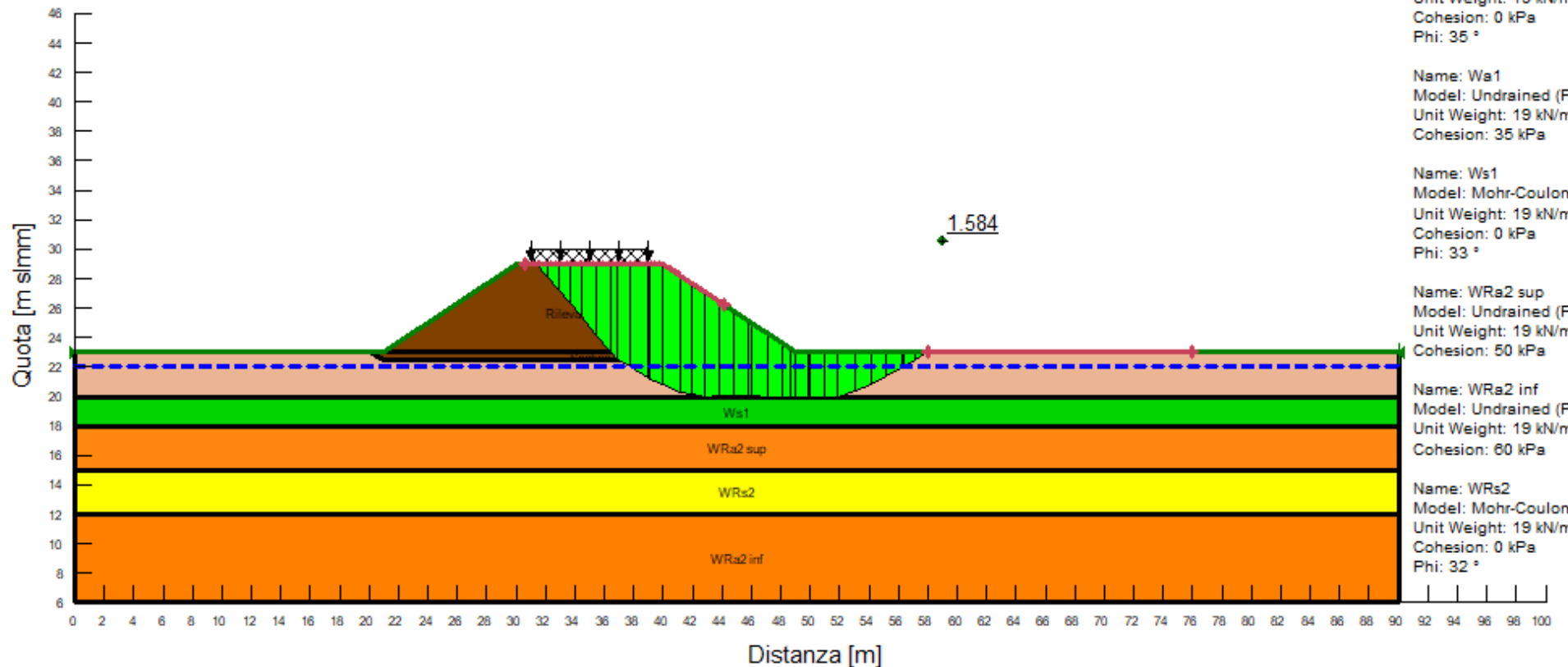
Name: Wa1  
Model: Undrained (Phi=  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 35 kPa

Name: Ws1  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 33 °

Name: WRa2 sup  
Model: Undrained (Phi=  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 50 kPa

Name: WRa2 inf  
Model: Undrained (Phi=  
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: 32 °



**Figura 9.6: NV24 - Rilevato H=6 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 002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>35 di 77</b>

## 9.4 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

### 9.4.1 Modelli e fasi di calcolo

Il modello utilizzato per queste analisi è mostrato nella Figura 9.7 e rappresenta la sezione di progetto del rilevato di approccio al Cavalcaferrovia NV24. L'altezza del rilevato in oggetto è pari a 10 metri escluso il pacchetto stradale, modellato nelle analisi come sovraccarico distribuito. La stratigrafia di calcolo utilizzata ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici sono riportati in Tabella 9.1 e Tabella 9.2.

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

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- generazione dello stato tensionale iniziale geostatico;
- costruzione dello strato di bonifica e dello scotico per una durata di 5 giorni;
- costruzione del rilevato di progetto per una durata di 6 mesi;
- costruzione del sovraccarico stradale sul rilevato di progetto per una durata di 30 giorni e successiva consolidazione di 5 mesi fino alla messa in opera del rilevato;
- consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio del traffico stradale per una durata di 6 mesi, 1 anno, 3 anni, 20 anni e 75 anni.

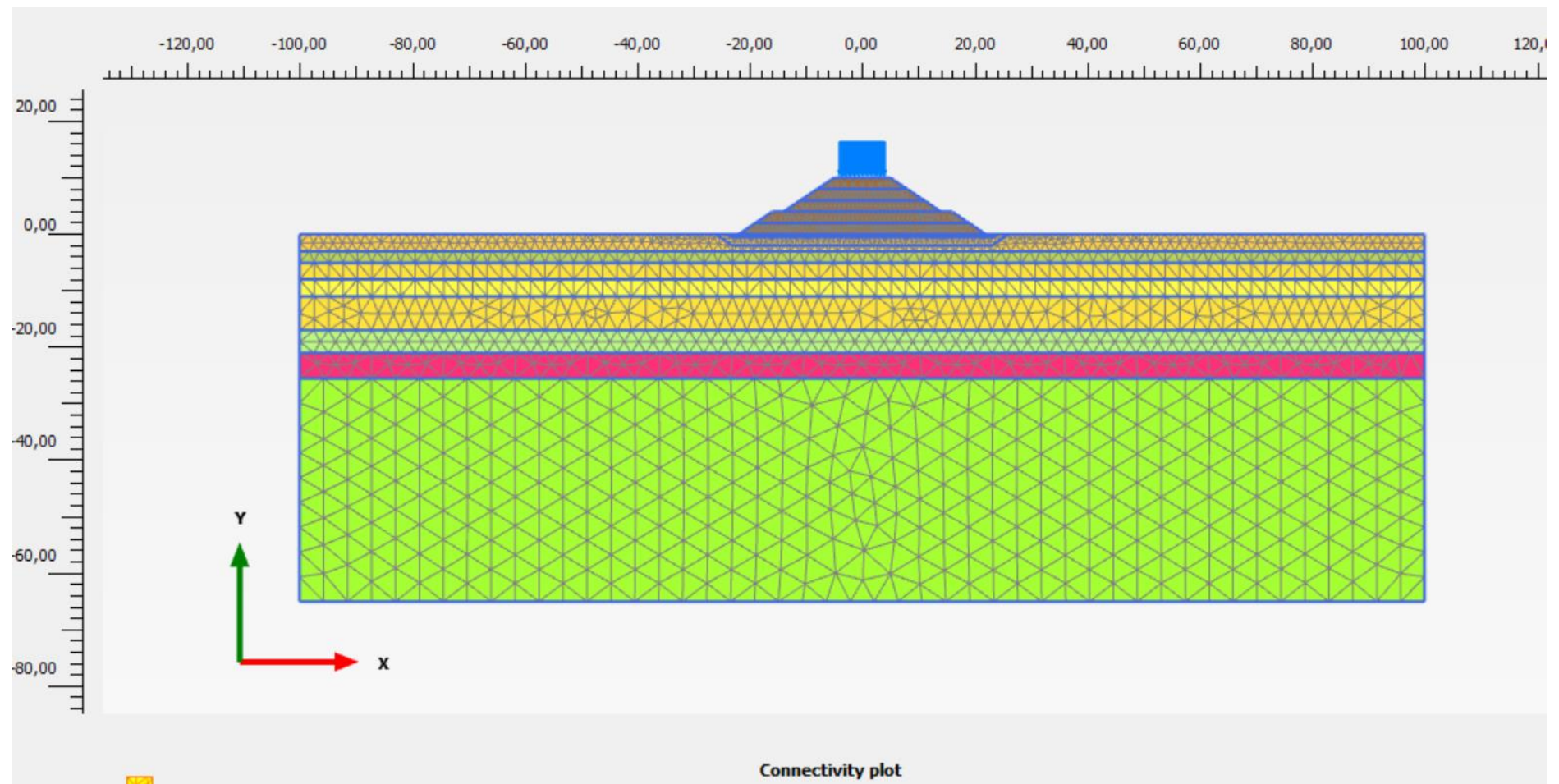


Figura 9.7: NV24 - Modello di calcolo

	<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 002</b>	REV. <b>A</b>	FOGLIO <b>37 di 77</b>

#### 9.4.2 Risultati

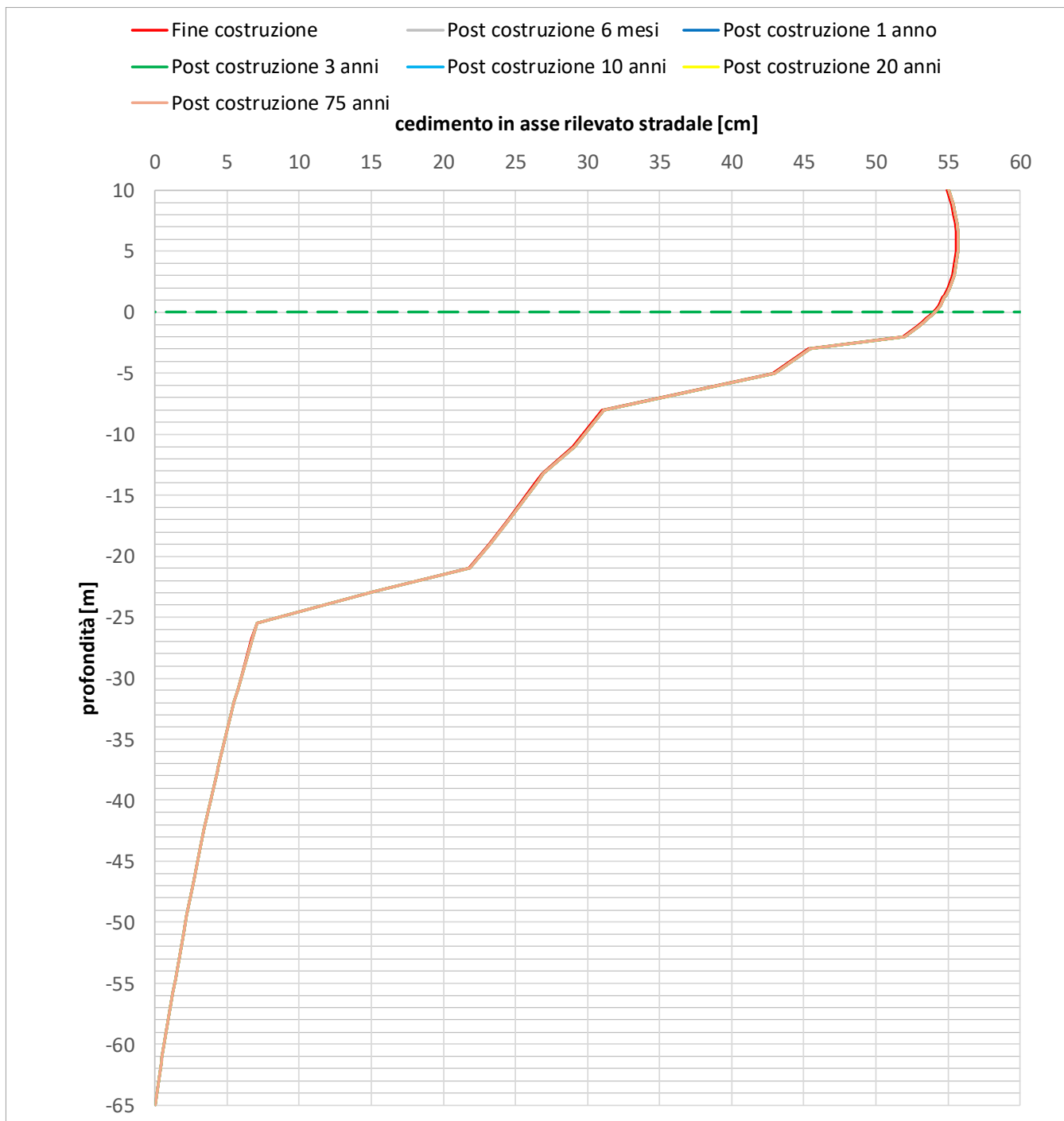
In Figura 9.8 e Figura 9.9 è riportato lo spostamento verticale  $u_y$  rispettivamente in corrispondenza di una sezione verticale coincidente con l'asse stradale e di una sezione orizzontale alla base del rilevato al termine delle seguenti fasi:

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

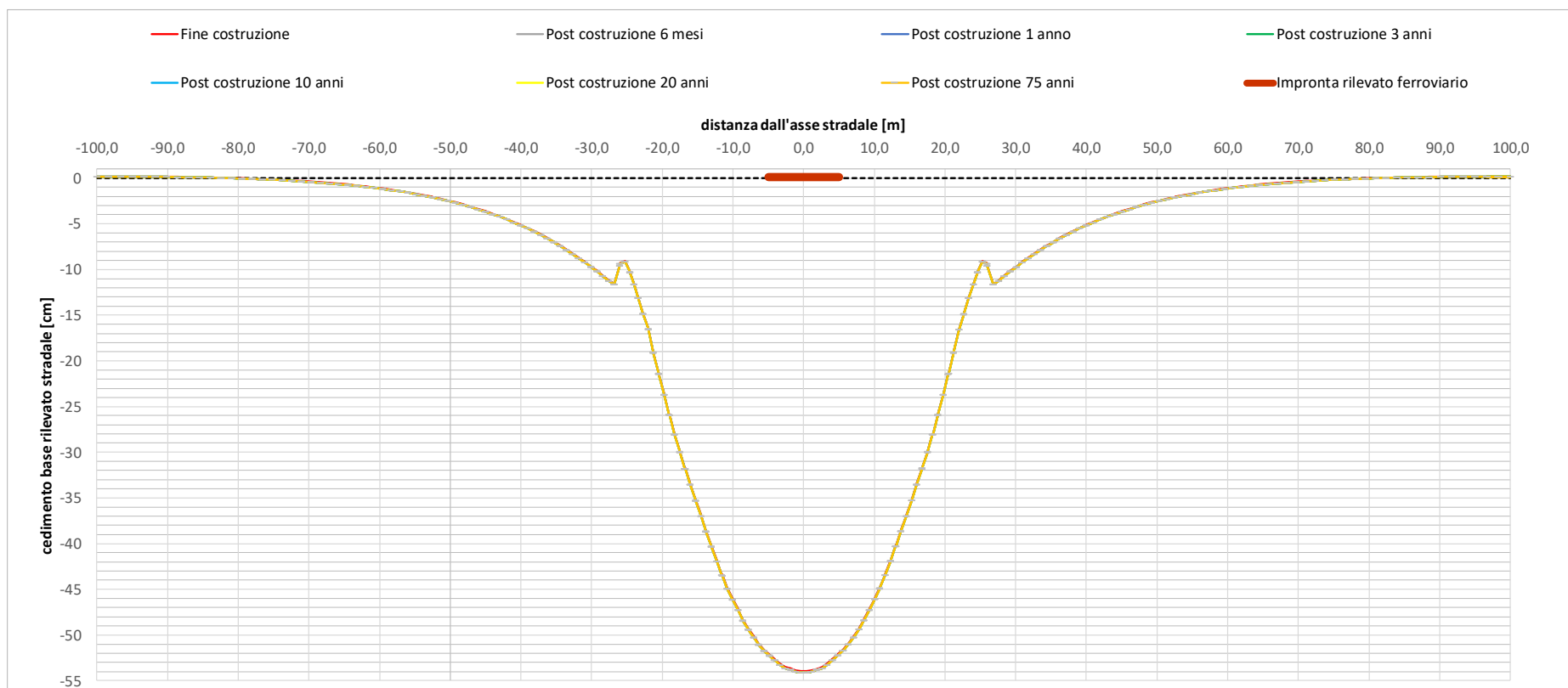
Come è possibile osservare in Figura 9.8 e Figura 9.9, dopo 6 mesi dal termine della costruzione il cedimento è prossimo al cedimento a lungo termine (75 anni), stato in cui c'è totale dissipazione delle sovrappressioni interstiziali indotte dal carico. Infatti, risulta che al termine della costruzione (messa in opera) il cedimento è pari a 55.58cm ed il cedimento dopo 75 anni è pari a 55.72cm.

In Figura 9.10, Figura 9.11, Figura 9.12, Figura 9.13 sono riportati i cedimenti a fine costruzione e a lungo termine e le sovrappressioni in eccesso per le stesse fasi di calcolo.

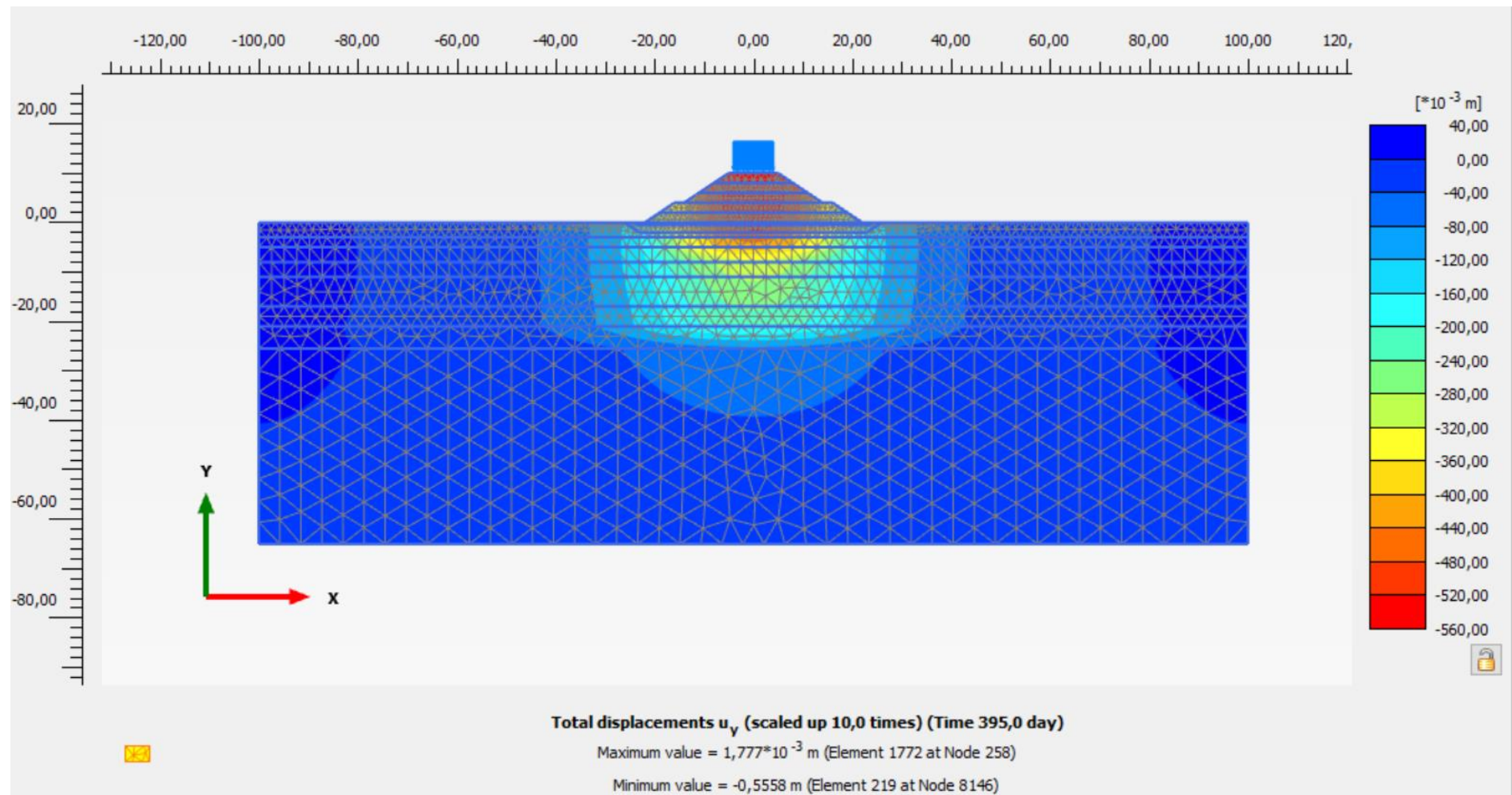
Il cedimento misurato a termine fine costruzione, pari a 55 cm circa, verrà sanato durante la messa in opera del rilevato stesso.



**Figura 9.8: NV24 – Spostamenti verticali in corrispondenza dell'asse del rilevato**



**Figura 9.9: NV24 – Spostamenti verticali in corrispondenza della base del rilevato**



**Figura 9.10: NV24 – Spostamenti verticali termine costruzione**



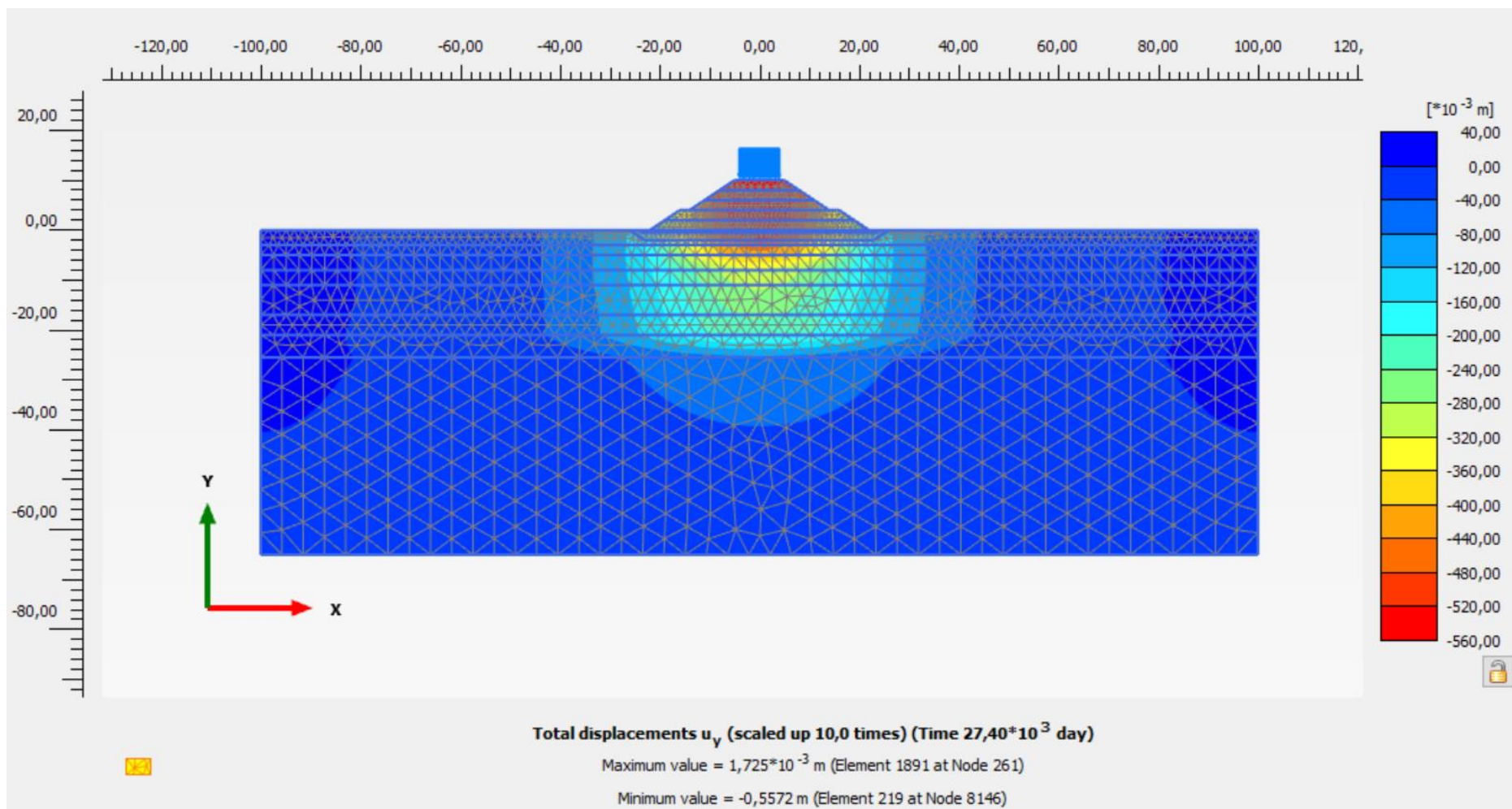


Figura 9.11: NV24 – Spostamenti verticali lungo termine

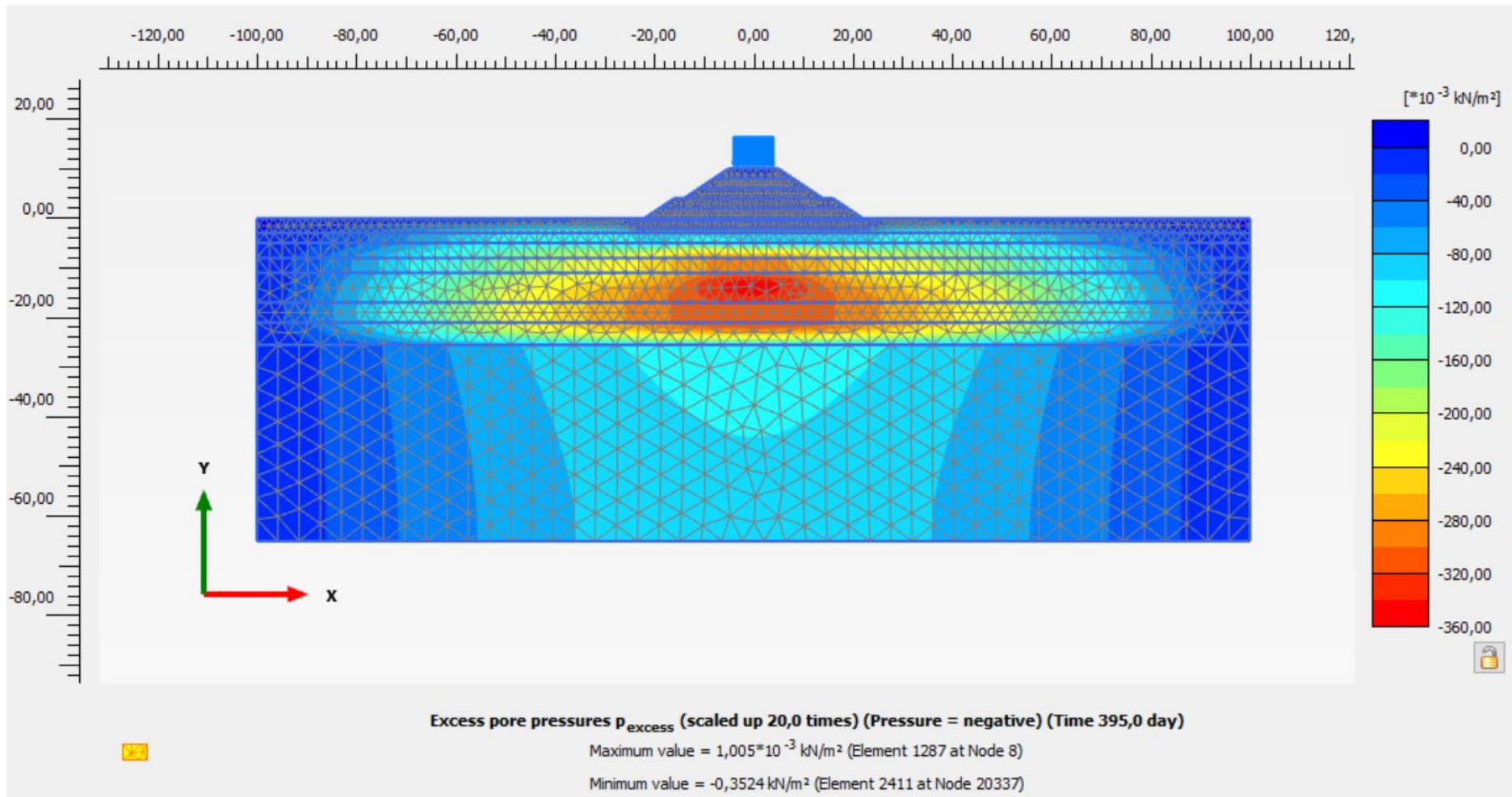


Figura 9.12: NV24 – Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  termine costruzione

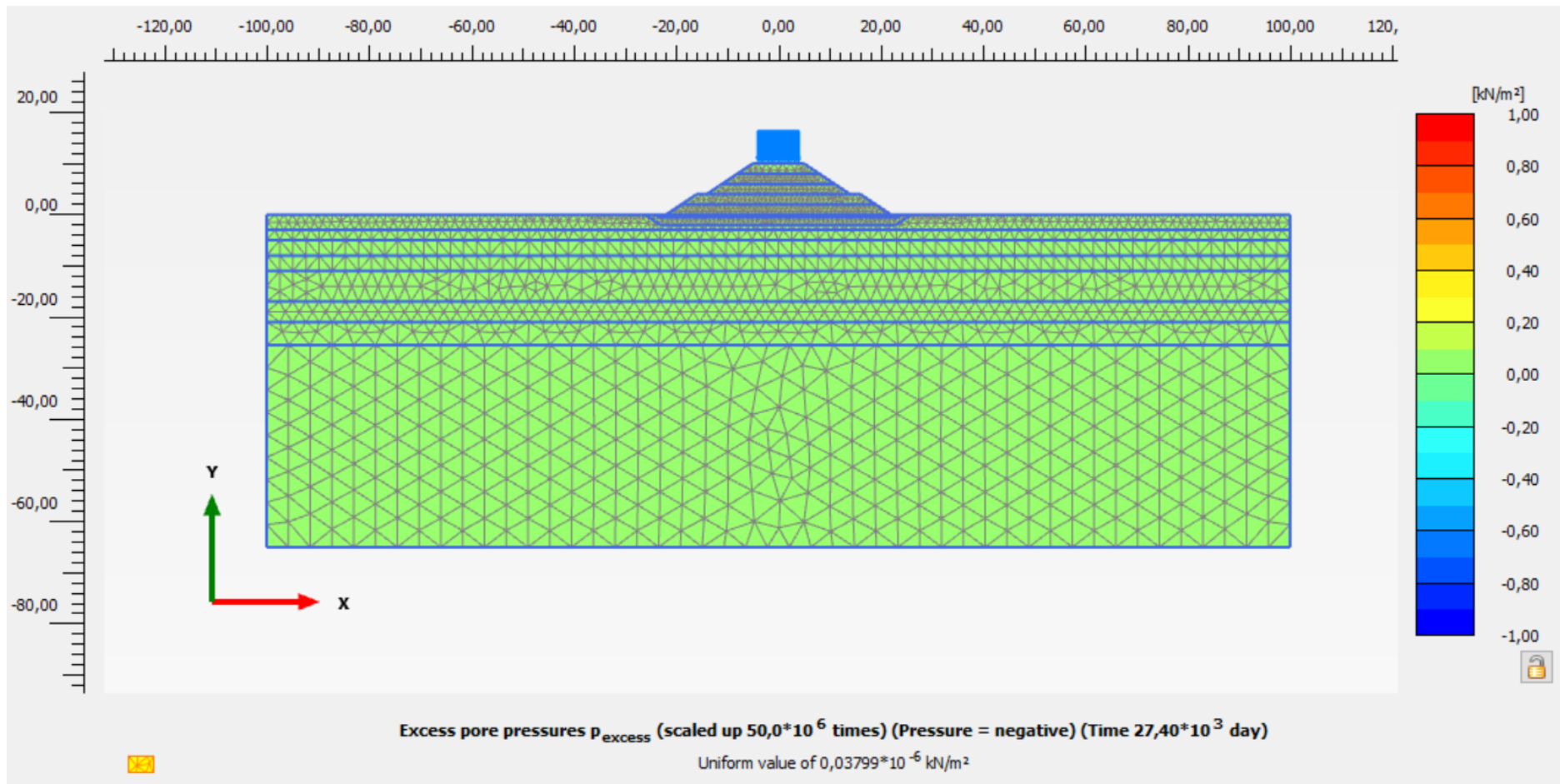


Figura 9.13: NV24 – Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  lungo termine

## 10. SEZIONE DI CALCOLO RILEVATO DI APPROCCIO ALL'OPERA NV24 (KM 65+364 CA.)

### 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 4, nella Tabella 10.1 e nella Tabella 10.2 sono riportati rispettivamente la stratigrafia ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto.

Si rimanda invece alla Tabella 7.1 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: Rilevato di approccio NV25 - Stratigrafia di calcolo**

Strato	Profondità da [m da p.c.]	Profondità a [m da p.c.]	Descrizione
Aa	0.0	5.0	Deposito alluvionale limoso sabbioso, da debolmente argilloso ad argilloso e/o argilla da limosa a con limo
As	5.0	11.0	Deposito alluvionale di sabbia limosa, localmente argillosa, con rara ghiaia
WRa2	11.0	14.5	Argilla limosa sabbiosa e/o limo argilloso sabbioso e/o argilla con sabbia con possibili livelli centimetrici di presenza organica
WRs2	14.5	17.0	Sabbia limosa, da debolmente argillosa ad argillosa
WRa2	17.0	22.0	Argilla limosa sabbiosa e/o limo argilloso sabbioso e/o argilla con sabbia con possibili livelli centimetrici di presenza organica
Rs1	22.0	50.0	Sabbia da debolmente limosa a limosa, localmente debolmente argillosa e/o limo sabbioso

 <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	FOGLIO 45 di 77

**Tabella 10.2: Rilevato di approccio NV25 - Parametri geotecnici di calcolo – 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
	$\gamma_d$	$\phi'_k$	$\phi'_{dM2}$	$c'_k$	$c'_{dM2}$	$c_u$	$c_{uM2}$	$E_{op.}$	CR	RR	OCR	k
	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[m/s]
Aa	19	26	21.3	0	0	40.0	28.6	-	0.17	0.034	1.5	5.0E-08
As	19	33	27.5	0	0	-	-	17.5 fino a 9 m da pc; 20 da 9 a 11 m da pc.	-	-	-	5.0E-07
WRa2	19	25	20.5	0	0	70.0	50.0	-	0.16	0.032	2	1.0E-08
WRs2	19	33	27.5	0	0	-	-	22.5	-	-	-	5.0E-07
WRa2	19	25	20.5	0	0	70.0	42.9	-	0.16	0.032	2	1.0E-08
Rs1	19	33	27.5	0	0	-	-	30.0	-	-	-	5.0E-07

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli alla profondità di 1.5 m dal piano campagna.

## 10.2 CARICHI DI PROGETTO

Per il dettaglio del carico di progetto assunto per il sovraccarico stradale per le verifiche SLU e per le verifiche SLE si faccia riferimento a quanto riportato nel paragrafo 7.3.

Nelle verifiche SLU in condizioni sismiche, in accordo a quanto riportato nel capitolo 5, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$K_H = + 0.060$  (concorde alla direzione di scivolamento)

$K_V = \pm 0.030$  (verificando la più cautelativa tra negativo e positivo)

La condizione più cautelativa risulta essere rappresentata da  $K_V = -0.030$ .

## 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. [15]). 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.

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico stradale. 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

 <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>46 di 77</b>

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. 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 10.3: Rilevato di approccio NV25 - Risultati verifiche di stabilità globale (analisi senza bonifica)**

ANALISI	$R/E_d$	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA	0.869	Figura 10.1
PSEUDOSTATICA	1.098	Figura 10.2

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 1.5 m (scotico + bonifica = 2 m). Il materiale sostituito è stato modellato con le stesse caratteristiche del materiale sostituito nello

 <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>47 di 77</b>

scotico (si veda Tabella 7.1). I risultati ottenuti nelle analisi di stabilità globale sono riportati in Tabella 10.4 insieme alle figure di riferimento.

**Tabella 10.4: Rilevato di approccio NV25 - Risultati verifiche di stabilità globale con scotico + bonifica =2.0m**

ANALISI	R/E <sub>d</sub>	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA	1.12	Figura 10.3
PSEUDOSTATICA	1.24	Figura 10.4

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, lo strato di bonifica sarà necessario per altezze di rilevato > di 6.0m. Per rilevati di altezza ≤ 6.0 m 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 6.0 m sono riportati in Tabella 9.5 insieme alle figure di riferimento

**Tabella 10.5: Rilevato di approccio NV25 - H<sub>RIL</sub>=6.0 m - Risultati verifiche di stabilità globale**

ANALISI	R/E <sub>d</sub>	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA	1.132	Figura 10.5
PSEUDOSTATICA	1.577	Figura 10.6

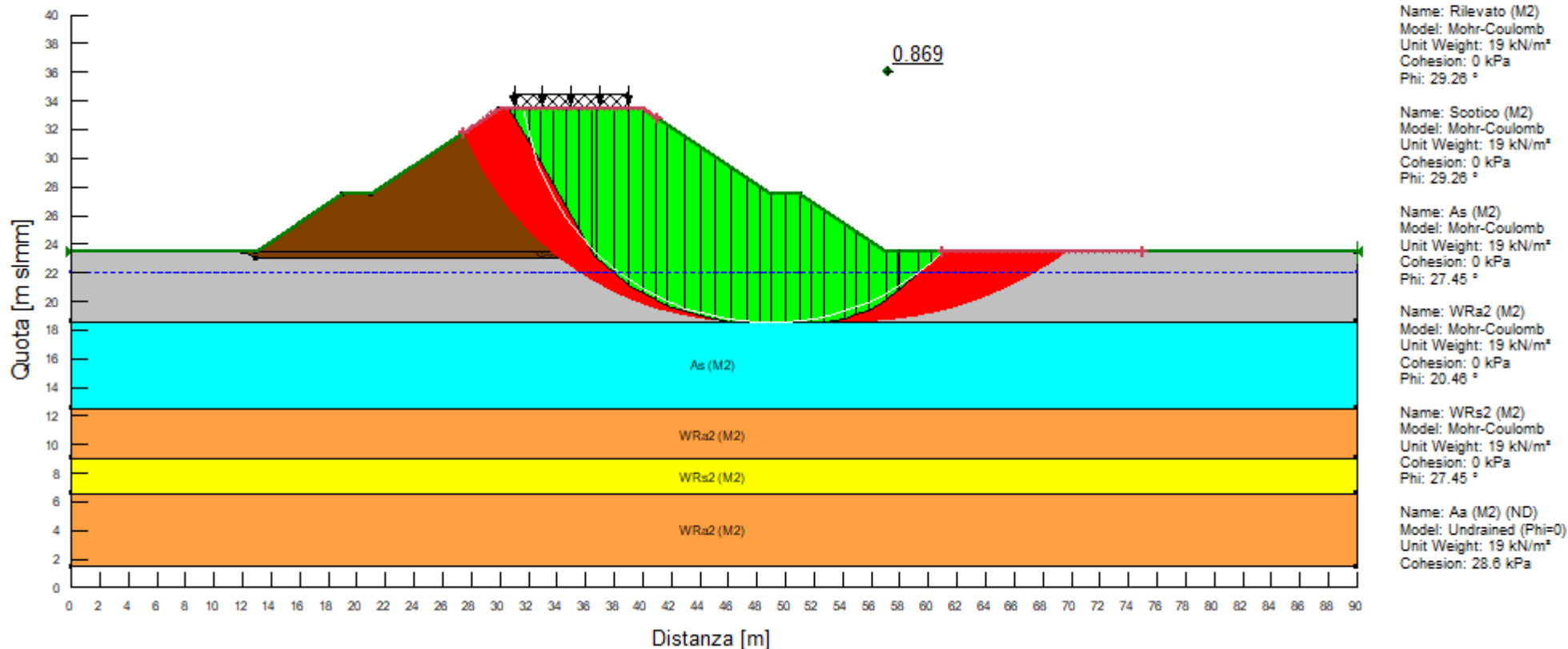
**ANALISI STATICA**

Rilevato Stradale Cavalcaferrovia NV25 km 65+375.

kh: 0

kv: 0

Sovraccarico Stradale (kN/m<sup>3</sup>): 26 kN/m<sup>3</sup>



Name: Rilevato (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 29.26 °

Name: Scotico (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 29.26 °

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

Name: Aa (M2) (ND)  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 28.6 kPa

**Figura 10.1: NV25 - Rilevato H=10 m - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2 senza strato di bonifica**



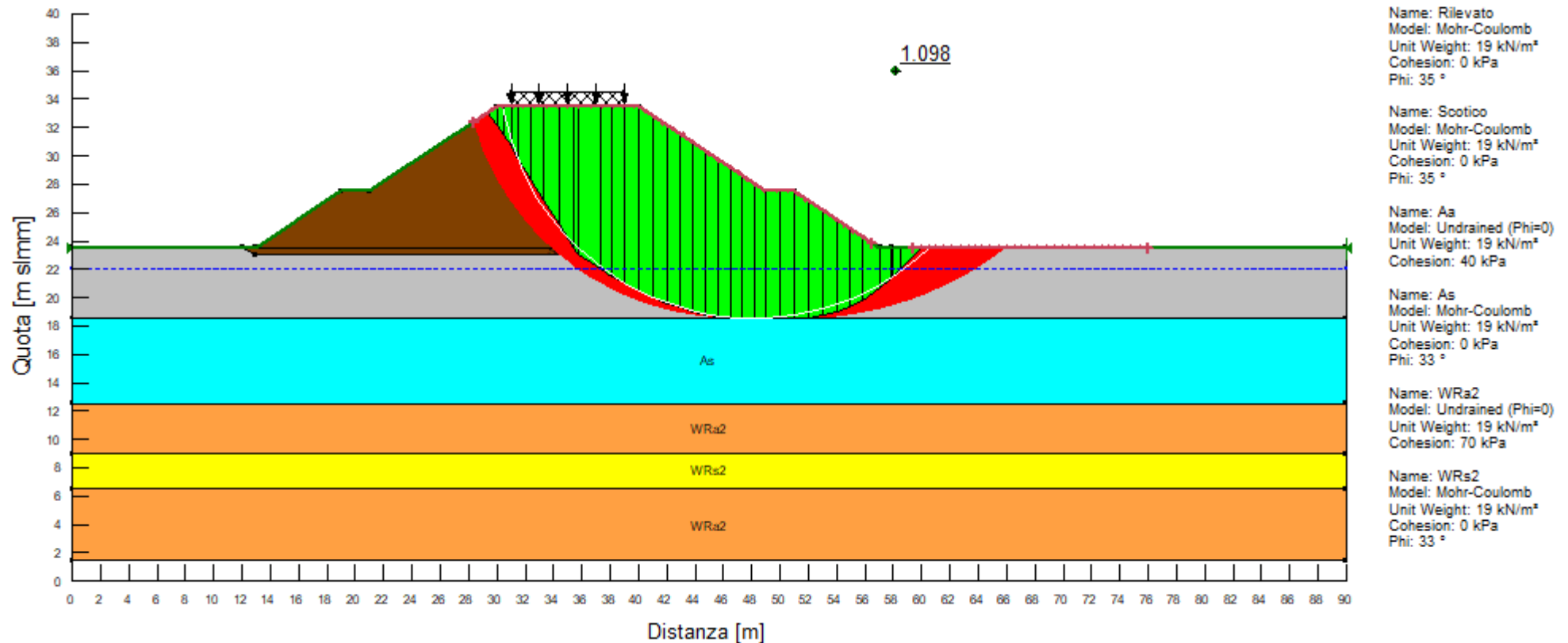
**ANALISI PSEUDO-STATICA**

Rilevato Stradale Cavalcaferrovia NV25 km 65+375.

kh: 0.060

kv: -0.030

Sovraccarico Stradale (kN/m<sup>3</sup>): 4 kN/m<sup>3</sup>



**Figura 10.2: NV25 - Rilevato H=10 m - Analisi di stabilità globale in campo sismico**

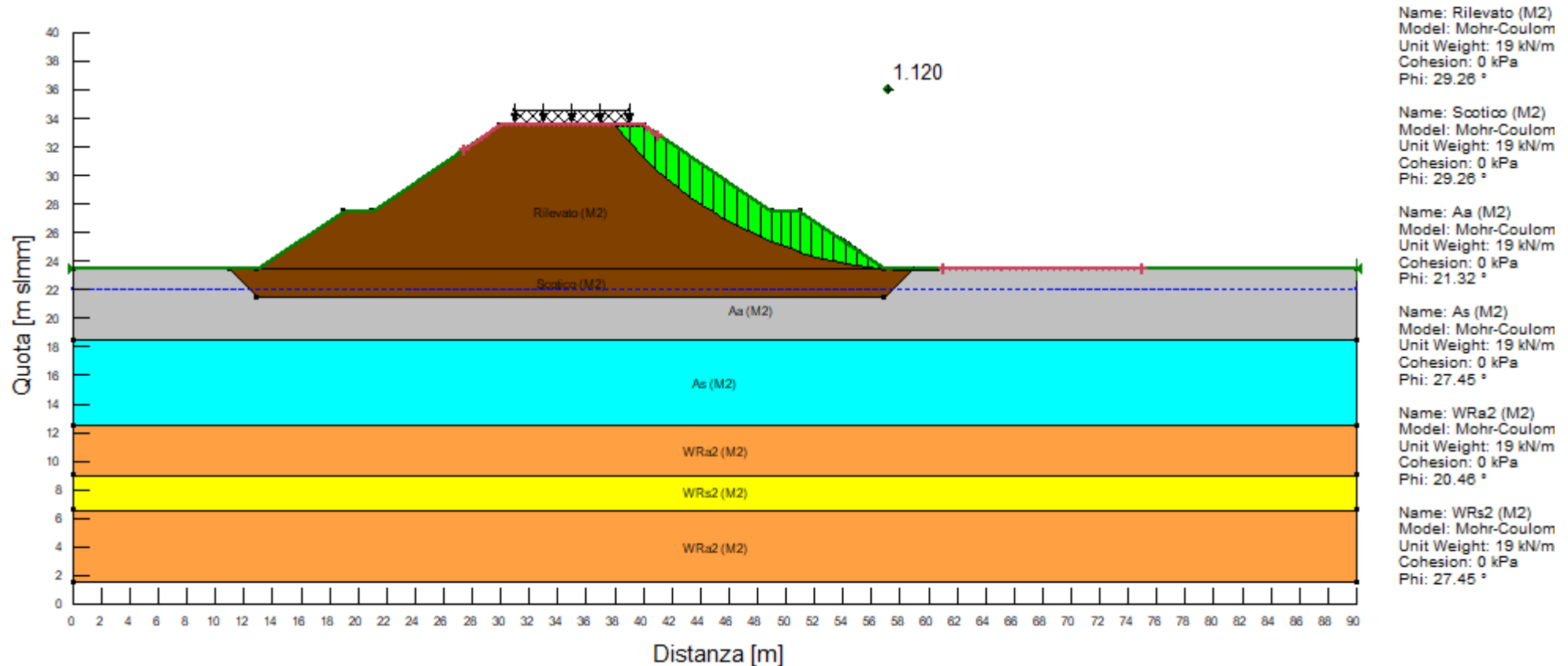
**ANALISI STATICA**

Rilevato Stradale Cavalcaferrovia NV25 km 65+375.

kh: 0

kv: 0

Sovraccarico Stradale (kN/m<sup>3</sup>): 26 kN/m<sup>3</sup>



**Figura 10.3: NV25 - Rilevato H=10 m - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2 con scotico + bonifica =2.0m**

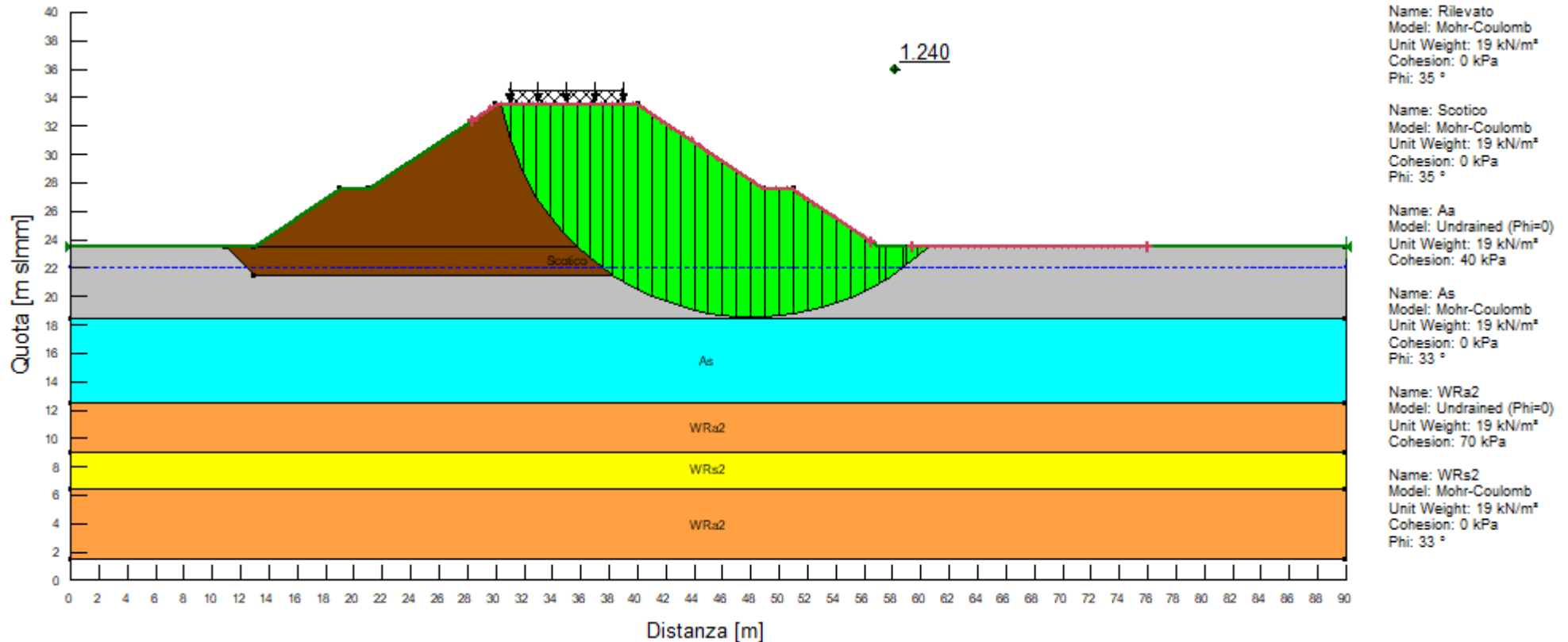
**ANALISI PSEUDO-STATICA**

Rilevato Stradale Cavalcaferrovia NV25 km 65+375.

kh: 0.060

kv: -0.030

Sovraccarico Stradale (kN/m<sup>3</sup>): 4 kN/m<sup>3</sup>



**Figura 10.4: NV25 - Rilevato H=10 m - Analisi di stabilità globale in campo sismico con scotico + bonifica =2.0m**

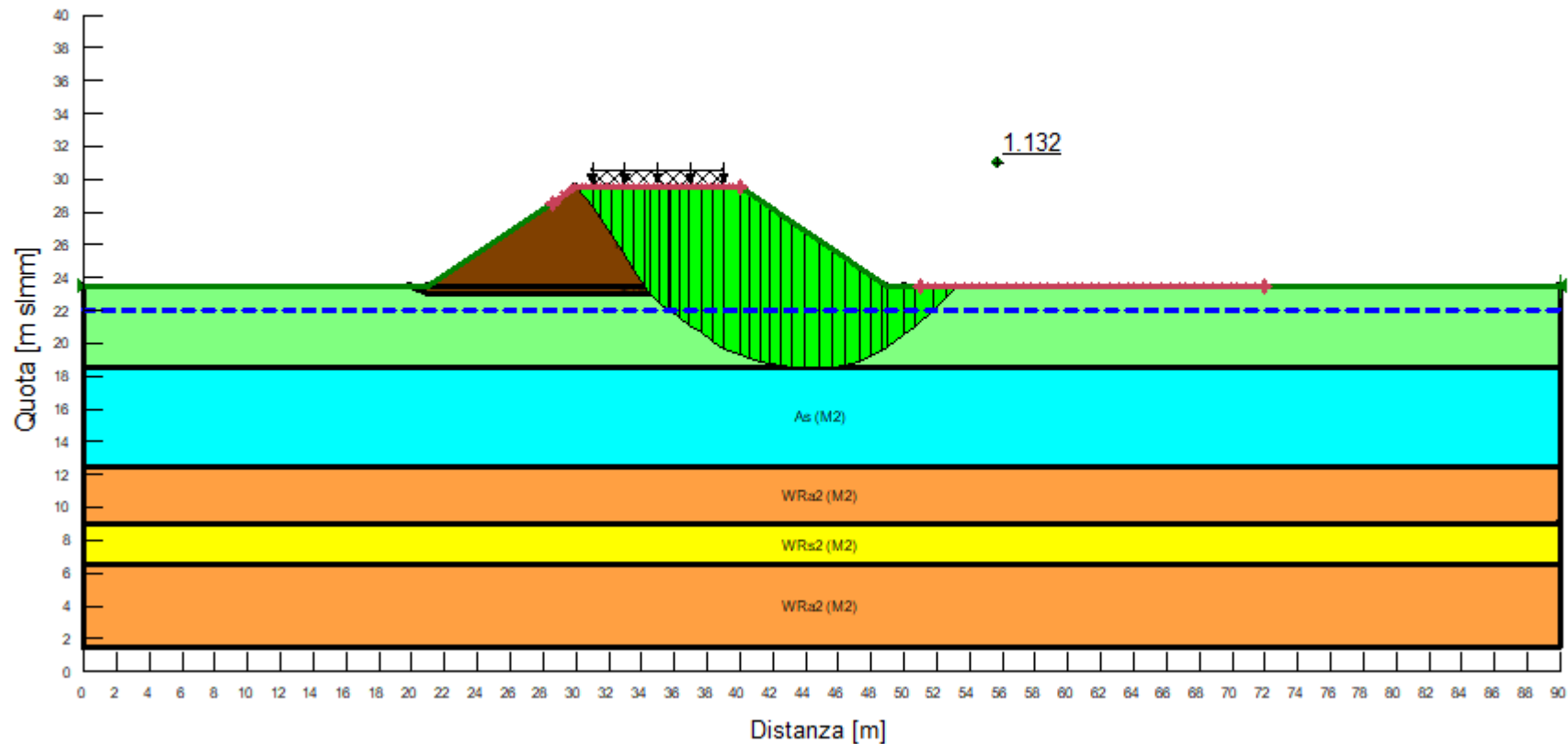
**ANALISI STATICA**

Rilevato Stradale Cavalcaferrovia NV25 km 65+375.

kh: 0

kv: 0

Sovraccarico Stradale (kN/m<sup>3</sup>): 26 kN/m<sup>3</sup>



Name: Rilevato (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 29.26 °

Name: Scotico (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 29.26 °

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

Name: Aa (M2) (2)  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 28.6 kPa

**Figura 10.5: NV25 - Rilevato H=6 m - Analisi di stabilità globale in campo statico**

**ANALISI PSEUDO-STATICA**

Rilevato Stradale Cavalcaferrovia NV25 km 65+375.

kh: 0.060

kv: -0.030

Sovraccarico Stradale (kN/m<sup>3</sup>): 4 kN/m<sup>3</sup>

Name: Rilevato  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 35 °

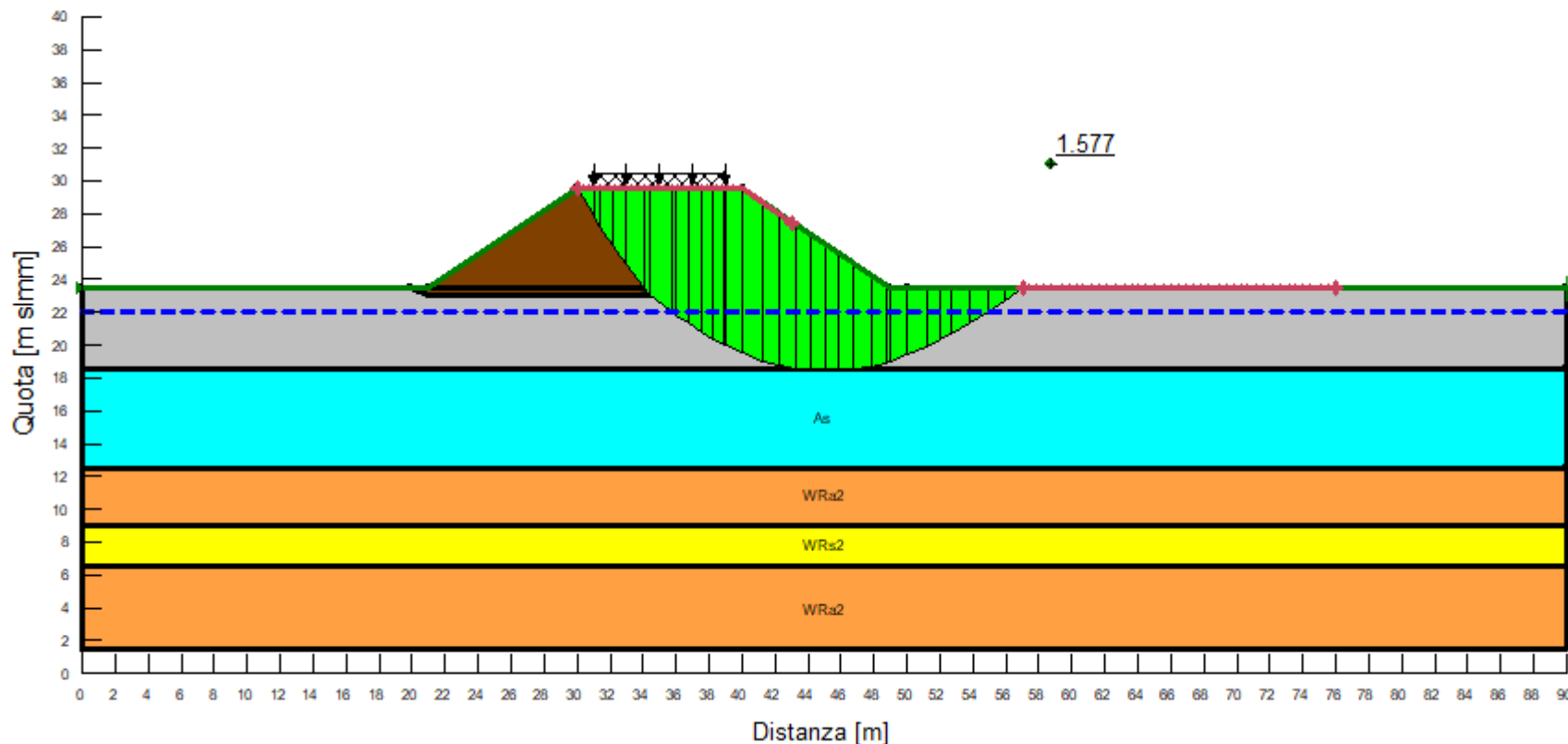
Name: Scotico  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 35 °

Name: Aa  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 40 kPa

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

Name: WRa2  
Model: Undrained (Phi=0)  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 70 kPa

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



**Figura 10.6: NV25 - Rilevato H=6 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>54 di 77</b>

## 10.4 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

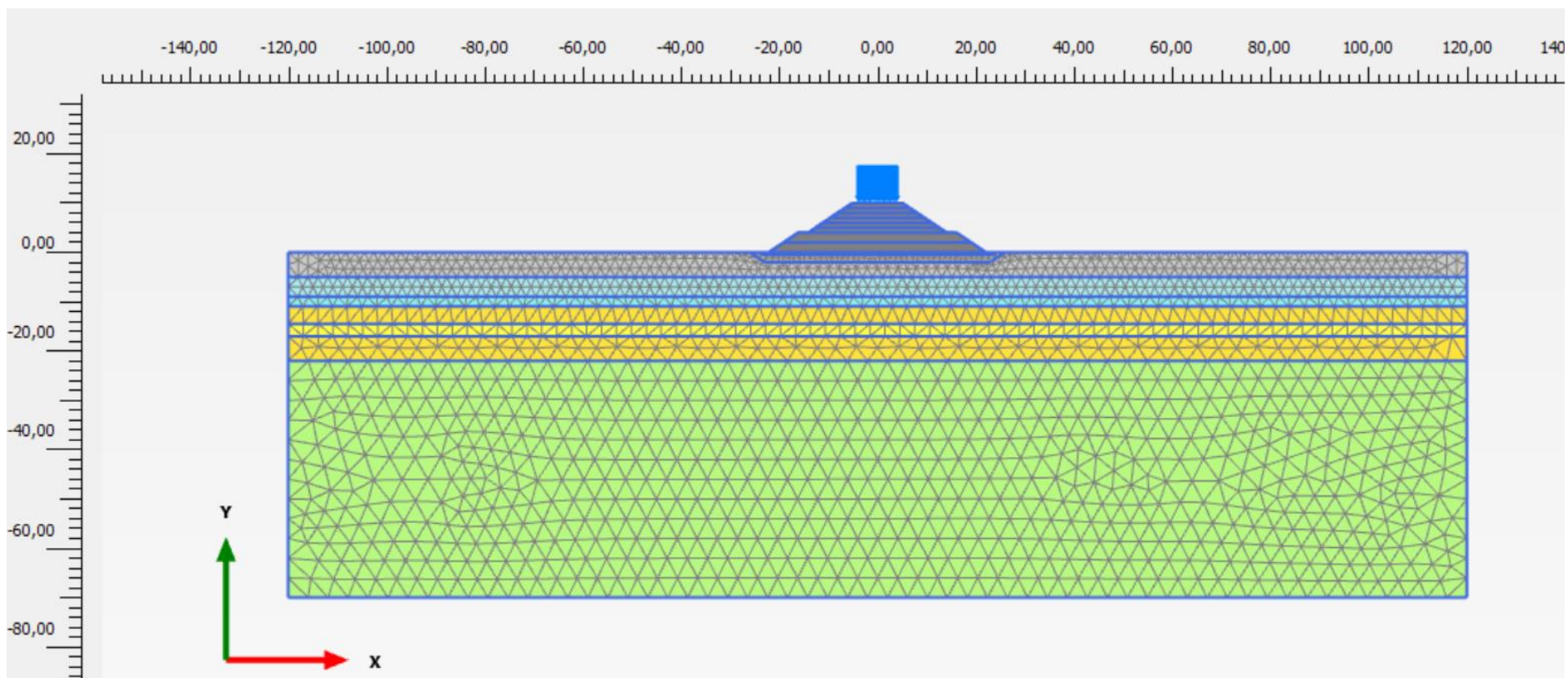
### 10.4.1 Modelli e fasi di calcolo

Il modello utilizzato per queste analisi è mostrato nella Figura 10.7 e rappresenta la sezione di progetto del rilevato di approccio al Cavalcaferrovia NV25. L'altezza del rilevato in oggetto è pari a 10 metri escluso il pacchetto stradale, 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 il sovraccarico stradale.

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- generazione dello stato tensionale iniziale geostatico;
- costruzione dello strato di bonifica e dello scotico per una durata di 5 giorni;
- costruzione del rilevato di progetto per una durata di 6 mesi;
- costruzione del sovraccarico stradale sul rilevato di progetto per una durata di 30 giorni e successiva consolidazione di 5 mesi fino alla messa in opera del rilevato;
- consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio del traffico stradale per una durata di 6 mesi, 1 anno, 3 anni, 20 anni e 75 anni.



**Figura 10.7: NV25 - Modello di calcolo**

	<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>56 di 77</b>

#### 10.4.2 Risultati

In Figura 10.8 e Figura 10.9 è riportato lo spostamento verticale  $u_y$  rispettivamente in corrispondenza di una sezione verticale coincidente con l'asse stradale e di una sezione orizzontale alla base del rilevato al termine delle seguenti fasi:

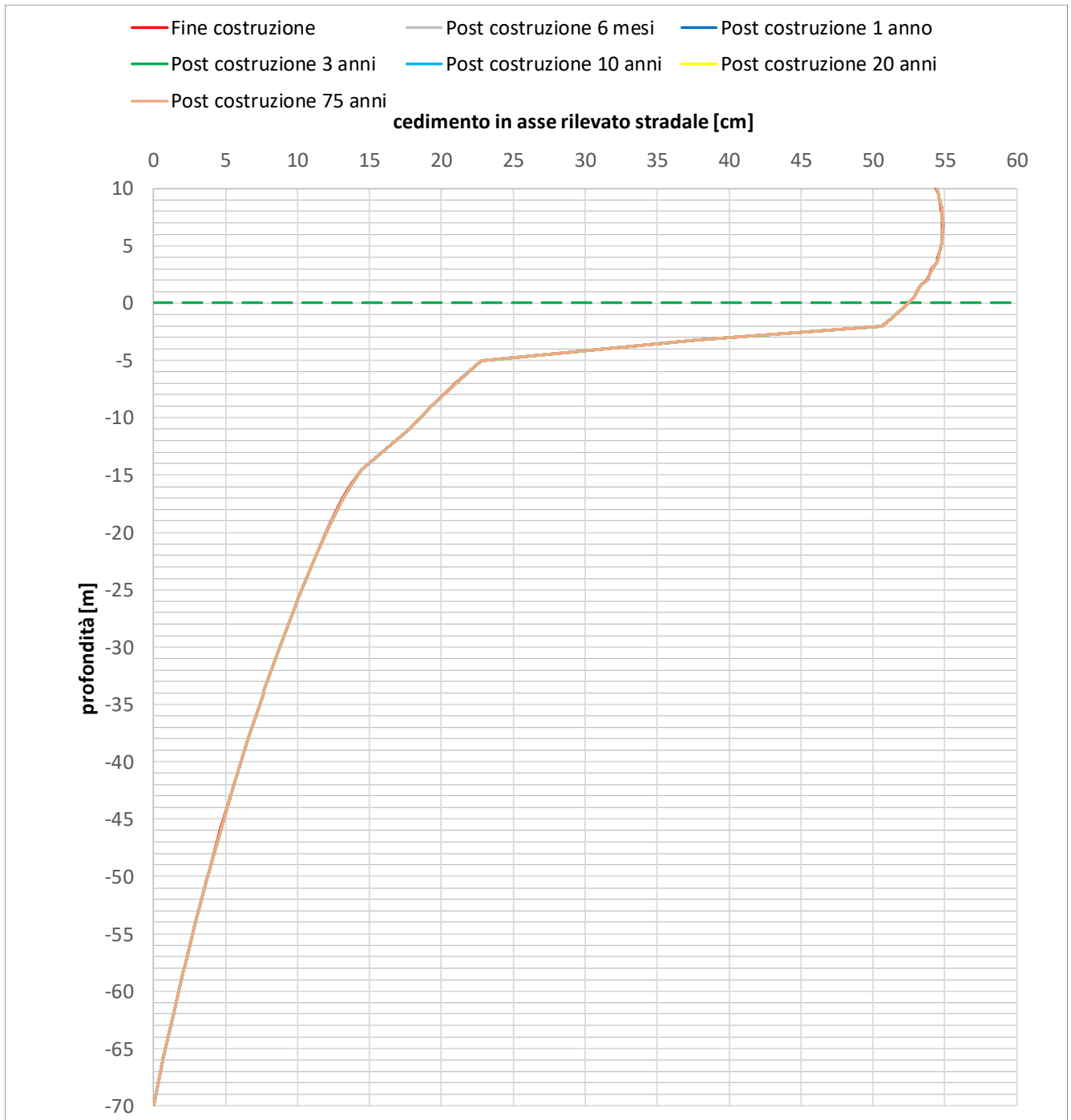
- al termine di tutte le fasi di costruzione del rilevato e messa in opera;
- dopo 6 mesi dall'entrata in esercizio del rilevato stradale;
- dopo 1 anno dall'entrata in esercizio del rilevato stradale;
- dopo 3 anni dall'entrata in esercizio del rilevato stradale;
- dopo 10 anni dall'entrata in esercizio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

Come è possibile osservare in Figura 10.8 e Figura 10.9 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. Infatti, risulta che al termine della costruzione (messa in opera) il cedimento è pari a 54.85cm ed il cedimento dopo 75 anni è pari a 54.86cm.

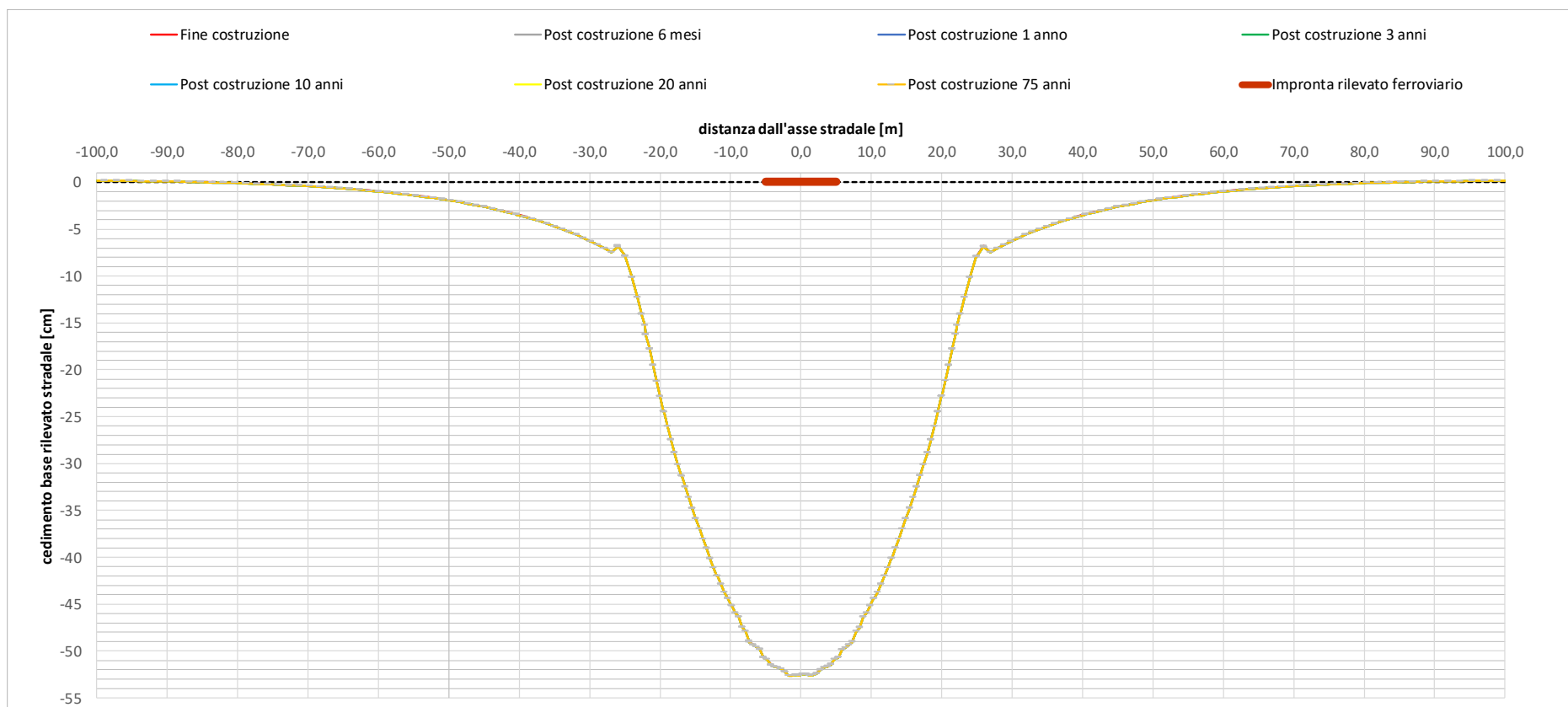
In Figura 10.10, Figura 10.11, Figura 10.12 e Figura 10.13 sono riportati i cedimenti a fine costruzione e a lungo termine e le sovrappressioni in eccesso per le stesse fasi di calcolo.

Il cedimento misurato a termine fine costruzione, pari a 55 cm circa, verrà sanato durante la messa in opera del rilevato stesso.

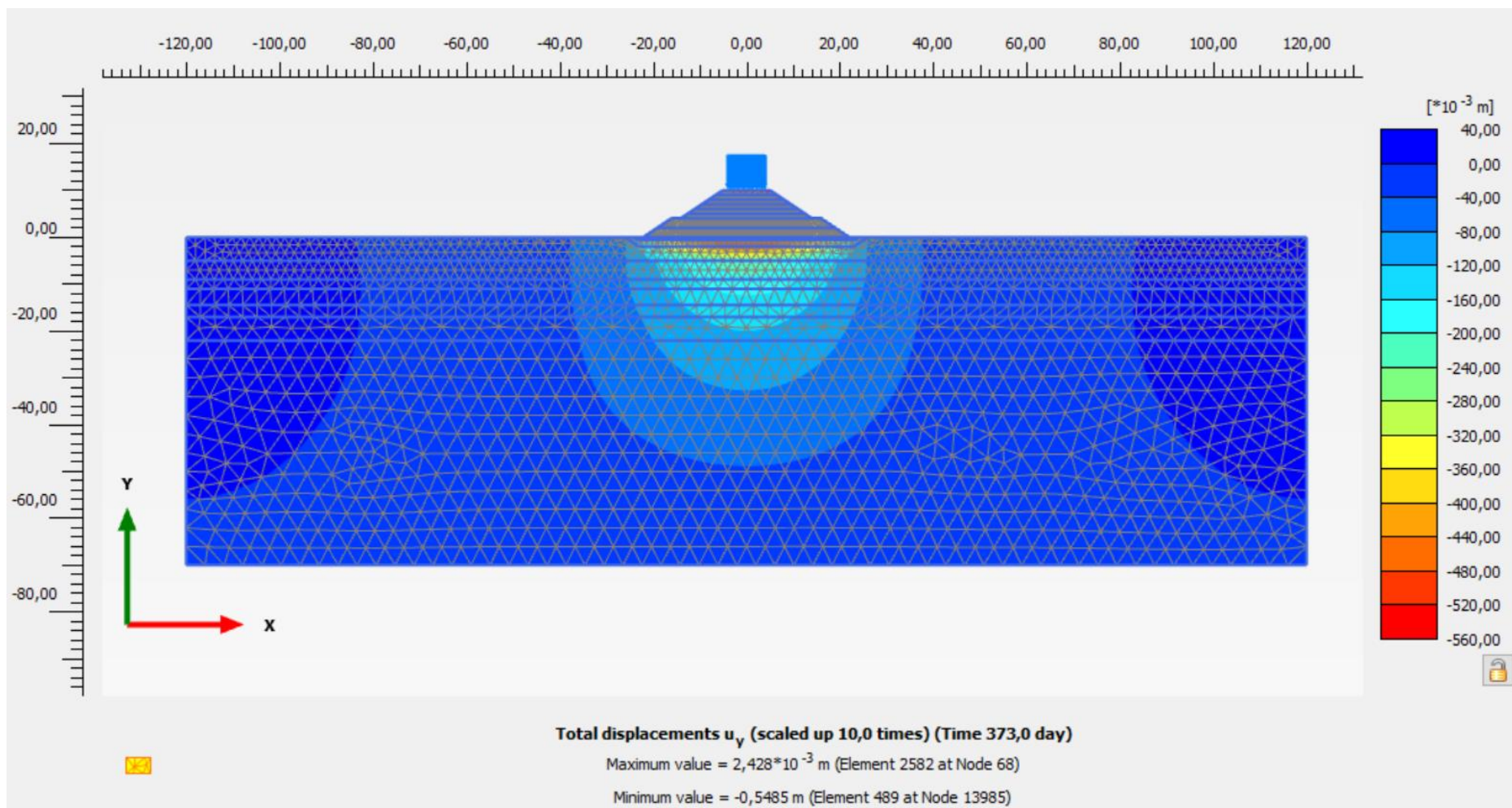




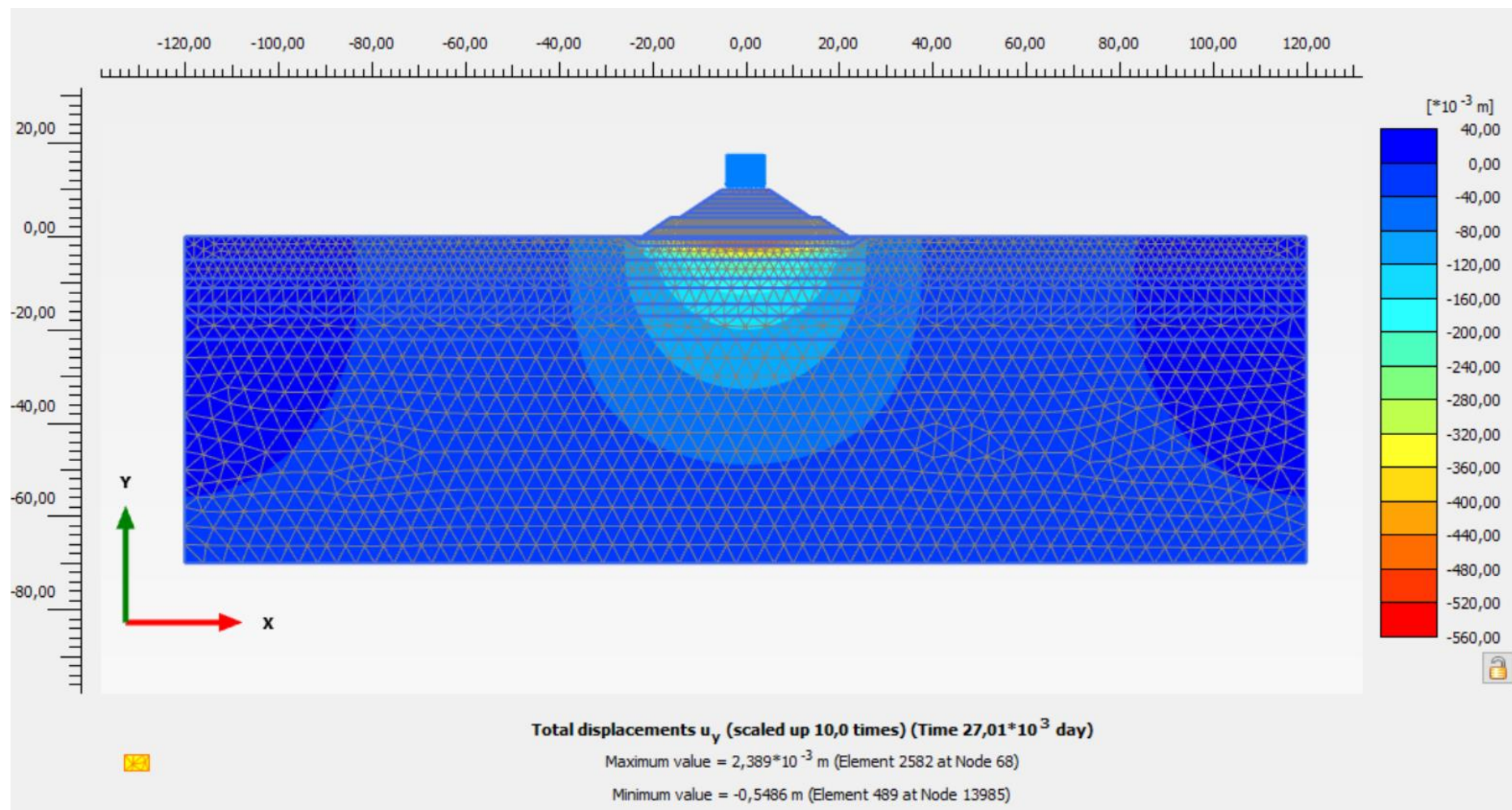
**Figura 10.8: NV25 – Spostamenti verticali in corrispondenza dell'asse del rilevato**



**Figura 10.9: NV25 – Spostamenti verticali in corrispondenza della base del rilevato**



**Figura 10.10: NV25 – Spostamenti verticali termine costruzione**



**Figura 10.11: NV25 – Spostamenti verticali lungo termine**

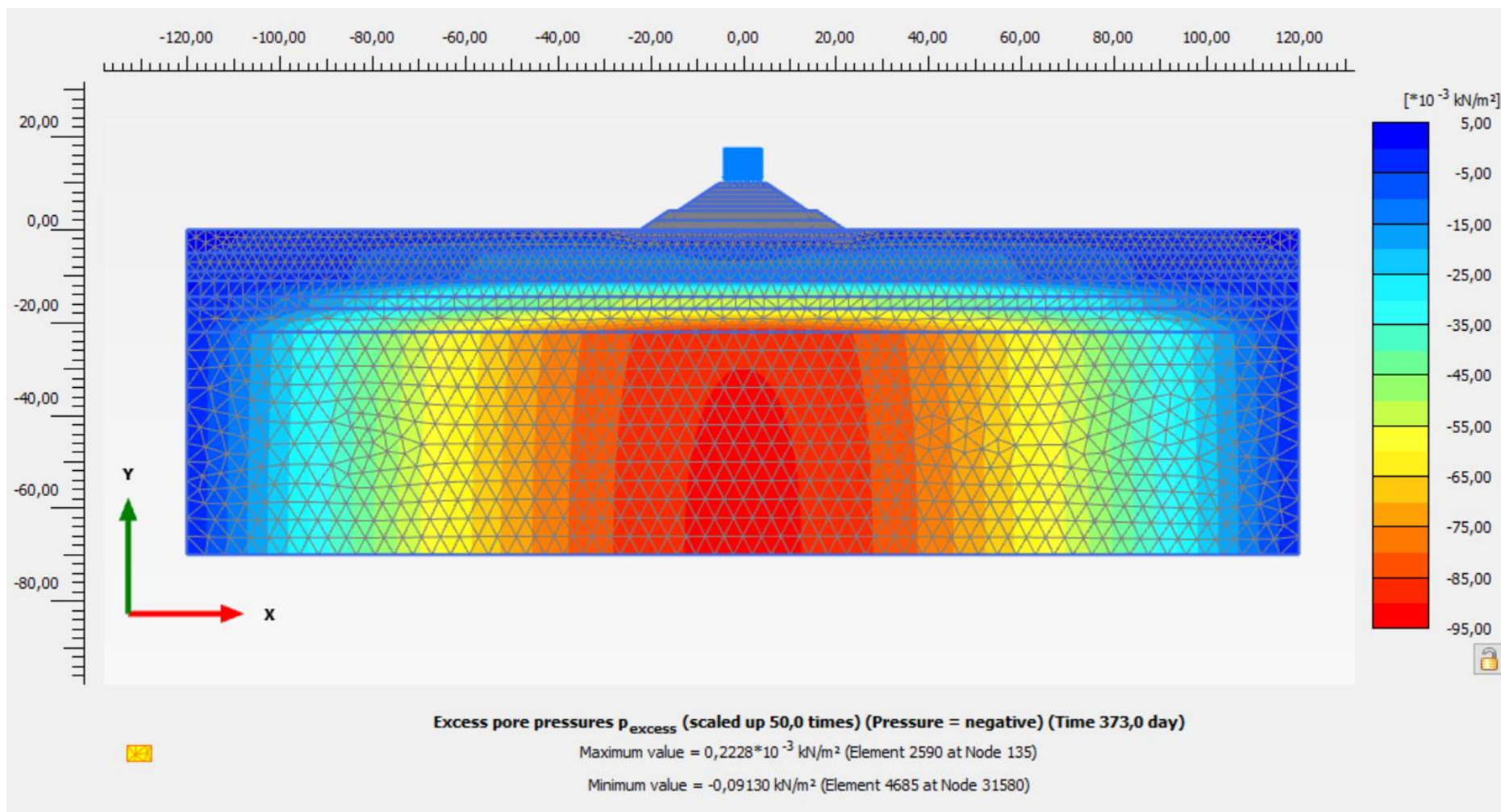


Figura 10.12: NV25 – Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  termine costruzione

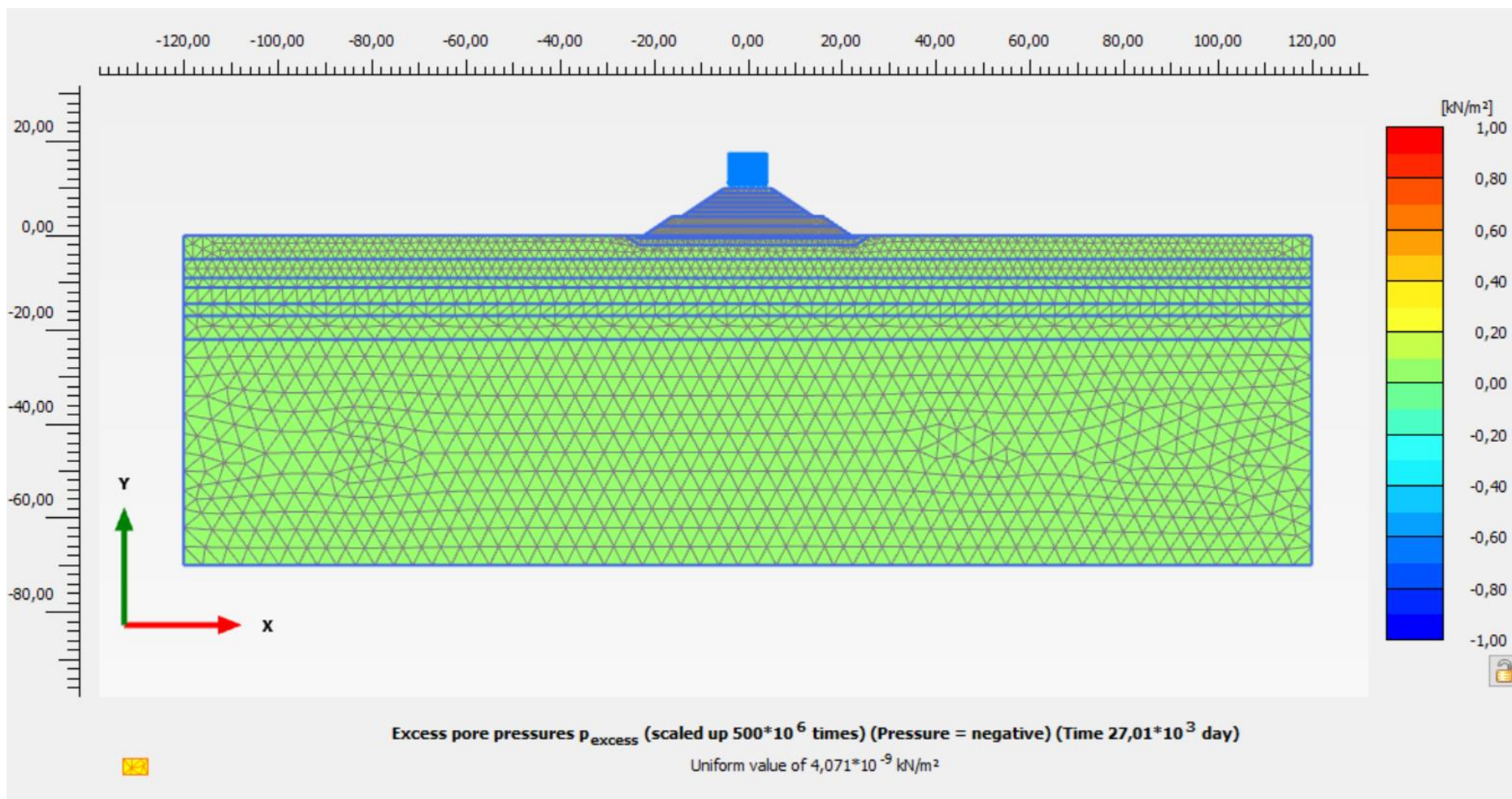


Figura 10.13: NV25 – Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  lungo termine

 <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>

## 11. SEZIONE DI CALCOLO RILEVATO DI APPROCCIO ALL'OPERA NV34 (KM 87+685 CA.)

### 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 4, nella Tabella 11.1 e nella

Tabella 11.2 sono riportati rispettivamente la stratigrafia ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto.

Si rimanda invece alla Tabella 7.1 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: Rivelato di approccio NV34 - Stratigrafia di calcolo**

<b>Strato</b>	<b>Profondità da [m da p.c.]</b>	<b>Profondità a [m da p.c.]</b>	<b>Descrizione</b>
WRs1	0	1,5	Sabbia da limosa a con limo, localmente debolmente argillosa e/o ghiaiosa e/o con clasti
WRa1	1,5	7,5	Limo argilloso, debolmente sabbioso o sabbioso e/o argilla limosa
Rs1	7,5	23.0	Sabbia da debolmente limosa a limosa, localmente debolmente argillosa e/o limo sabbioso
Rs2	23.0	50.0	Sabbia da debolmente limosa a limosa, localmente argillosa

 <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 11.2: Rilevato di approccio NV34 - Parametri geotecnici di calcolo – 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]
WRs1	19	34	28.3	0	0	-	-	7.5	-	-	-	2.0E-07
WRa1	19	27	22.2	0	0	70	50	-	0,18	0,036	3	5.0E-08
Rs1	19	33	27.5	0	0	-	-	20 fino a 12 m da pc; 27.5 da 12 m in poi	-	-	-	5.0E-07
Rs2	19	34	28.3	0	0	-	-	32.5	-	-	-	1.0E-06

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli alla profondità di 6.0 m dal piano campagna.

## 11.2 CARICHI DI PROGETTO

Per il dettaglio del carico di progetto assunto per il sovraccarico stradale per le verifiche SLU e per le verifiche SLE si faccia riferimento a quanto riportato nel paragrafo 7.3.

Nelle verifiche SLU in condizioni sismiche, in accordo a quanto riportato nel capitolo 5, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$$K_H = + 0.079 \quad (\text{concorde alla direzione di scivolamento})$$

$$K_V = \pm 0.040 \quad (\text{verificando la più cautelativa tra negativo e positivo})$$

La condizione più cautelativa risulta essere rappresentata da  $K_V = -0.040$ .



 <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>65 di 77</b>

### 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. [15]). 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.

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico stradale. 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. 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 11.3: Rilevato di approccio NV34 - Risultati verifiche di stabilità globale (analisi senza bonifica)**

ANALISI	$R/E_d$	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA	1,115	Figura 11.1
PSEUDOSTATICA	1.202	Figura 11.2

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

**ANALISI STATICA**

Rilevato Stradale Cavalcaferrovia NV34 km 87+685.

kh: 0

kv: 0

Sovraccarico Stradale (kN/m<sup>3</sup>): 26 kN/m<sup>3</sup>

Name: Rilevato stradale (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 29.26 °

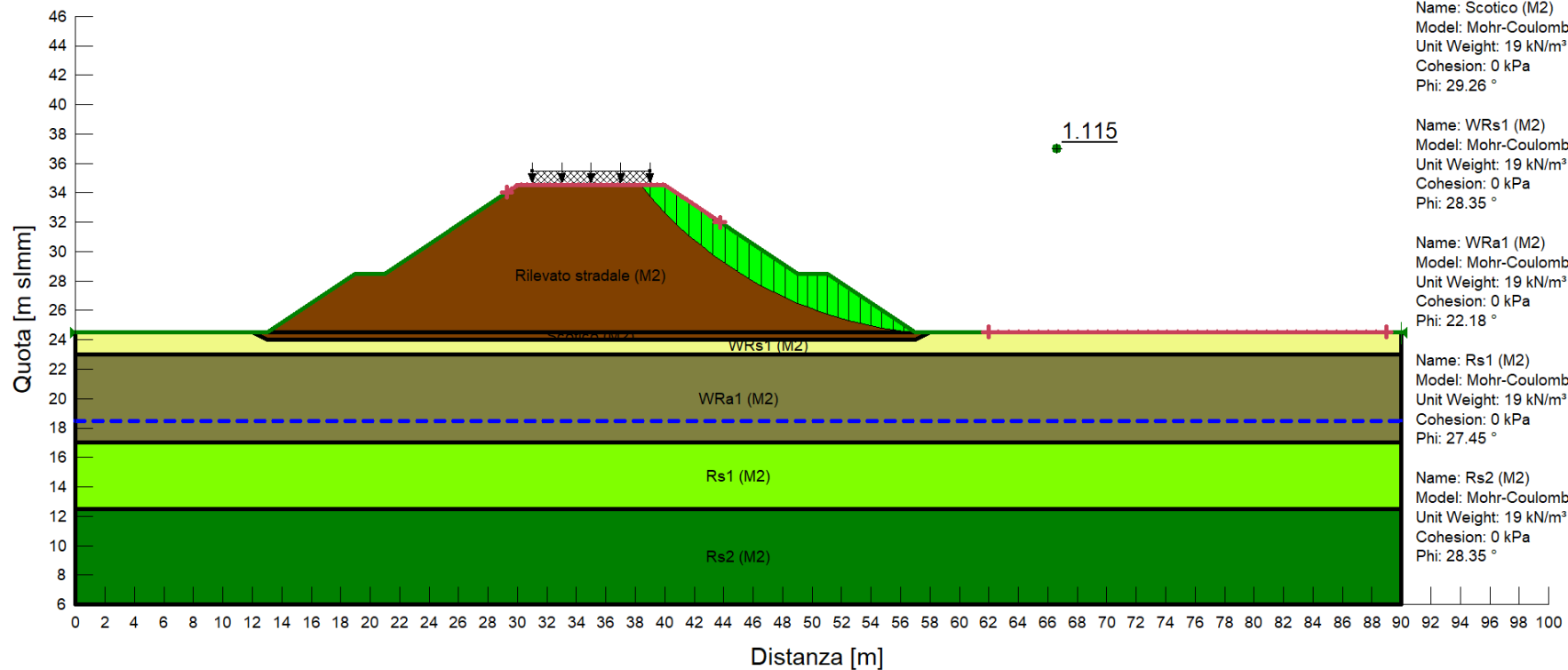
Name: Scotico (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 29.26 °

Name: WRS1 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 28.35 °

Name: WRa1 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 22.18 °

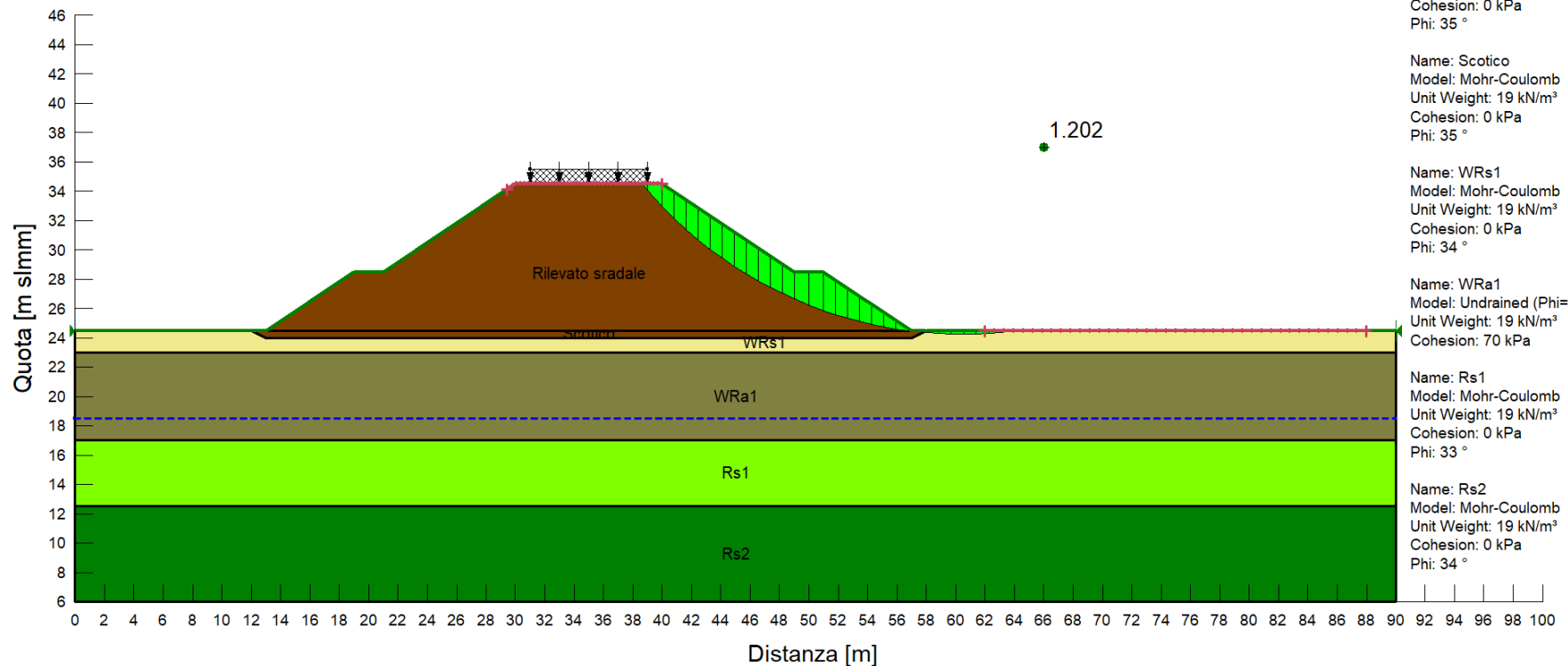
Name: Rs1 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 27.45 °

Name: Rs2 (M2)  
Model: Mohr-Coulomb  
Unit Weight: 19 kN/m<sup>3</sup>  
Cohesion: 0 kPa  
Phi: 28.35 °



**Figura 11.1: NV34 - Rilevato H=10 m - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2 senza strato di bonifica**

ANALISI PSEUDO-STATICA  
Rilevato Stradale Cavalcaferrovia NV34 km 87+685.  
kh: 0.079  
kv: -0.040  
Sovraccarico Stradale (kN/m<sup>3</sup>): 4 kN/m<sup>3</sup>



**Figura 11.2: NV34 - Rilevato H=10 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>69 di 77</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 11.7 e rappresenta la sezione di progetto del rilevato di approccio al Cavalcaferrovia NV34. L'altezza del rilevato in oggetto è pari a 10 metri escluso il pacchetto stradale, 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 stradale.

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- generazione dello stato tensionale iniziale geostatico;
- costruzione dello scotico per una durata di 5 giorni;
- costruzione del rilevato di progetto per una durata di 6 mesi;
- costruzione del sovraccarico stradale sul rilevato di progetto per una durata di 30 giorni e successiva consolidazione di 5 mesi fino alla messa in opera del rilevato;
- consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio del traffico stradale per una durata di 6 mesi, 1 anno, 3 anni, 20 anni e 75 anni.

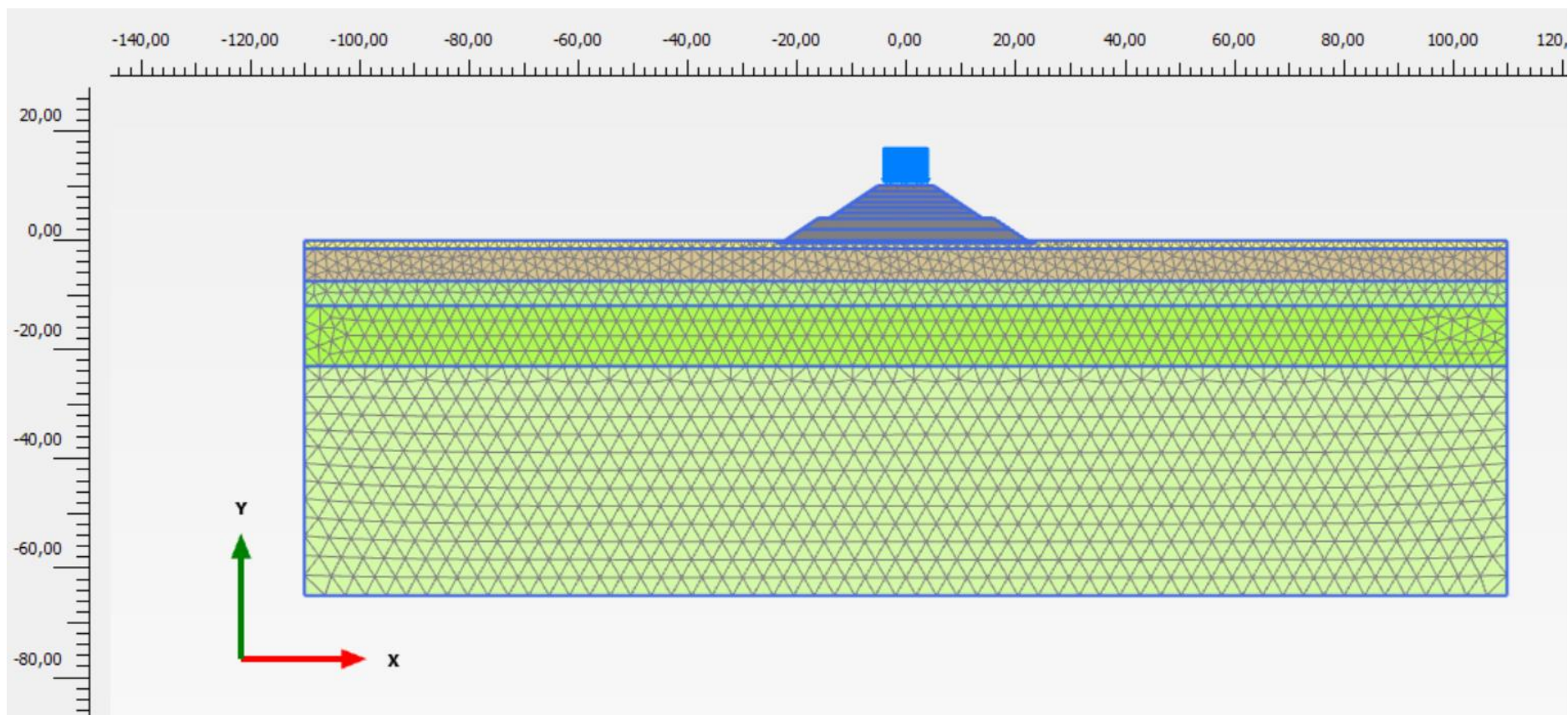


Figura 11.3: NV34 - Modello di calcolo

	<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>71 di 77</b>

### 11.4.2 Risultati

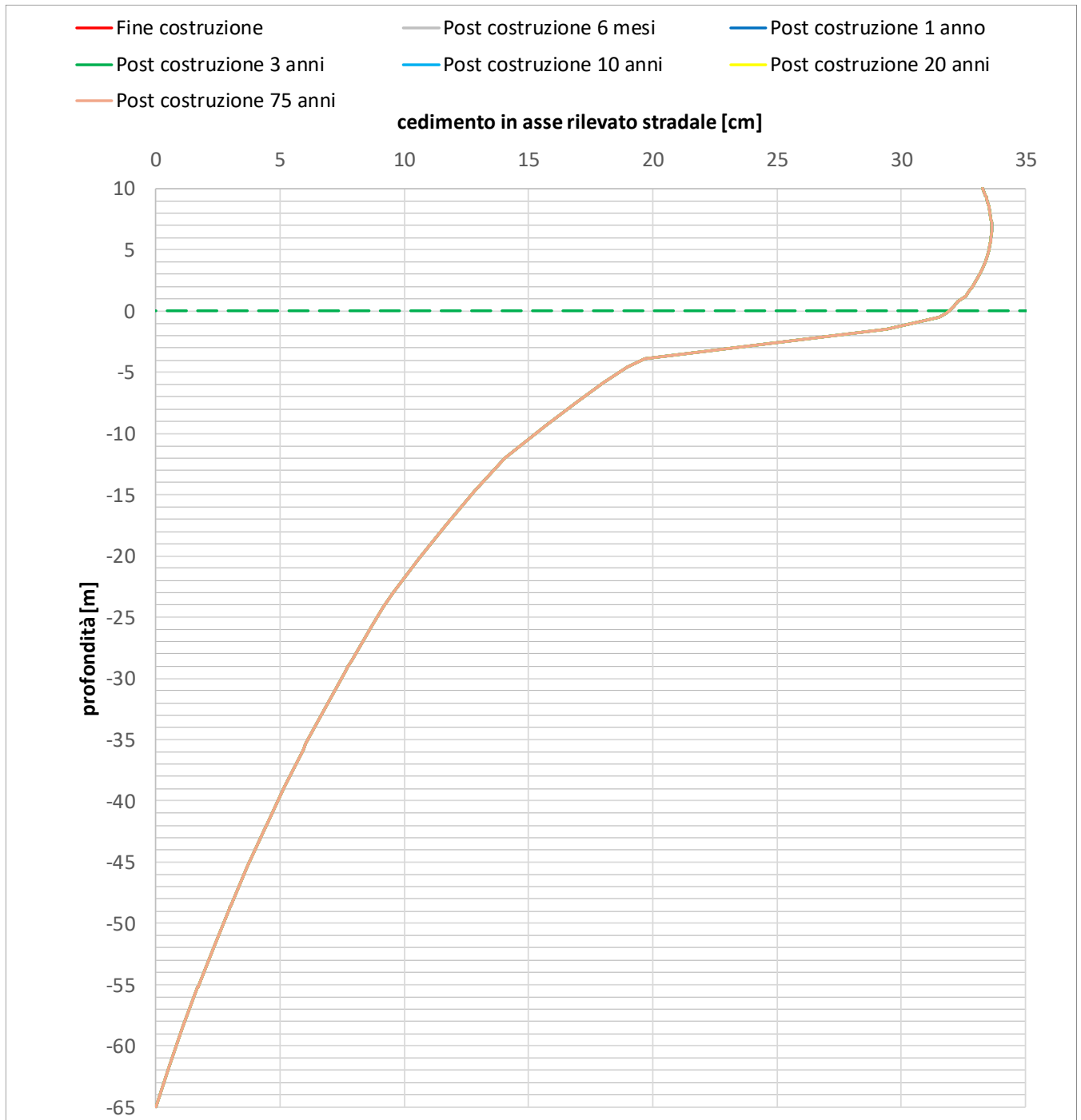
In Figura 11.4 e Figura 11.5 è riportato lo spostamento verticale  $u_y$  rispettivamente in corrispondenza di una sezione verticale coincidente con l'asse stradale e di una sezione orizzontale alla base del rilevato al termine delle seguenti fasi:

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

Come è possibile osservare in Figura 11.4 e Figura 11.4, 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. Infatti, risulta che al termine della costruzione (messa in opera) il cedimento è pari a 33.60cm ed il cedimento dopo 75 anni è pari a 33.63cm.

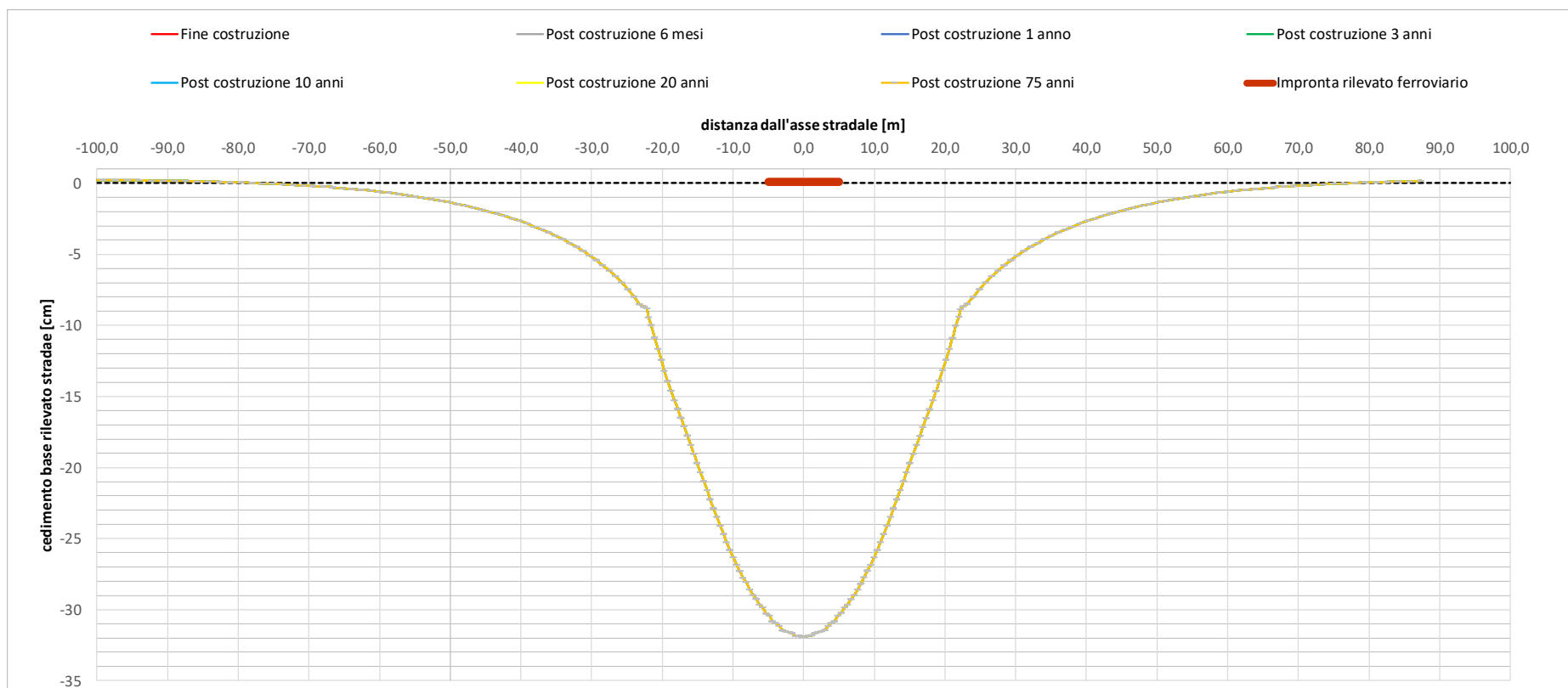
In Figura 11.6, Figura 11.7, Figura 11.8 e Figura 11.9 sono riportati i cedimenti a fine costruzione e a lungo termine e le sovrappressioni in eccesso per le stesse fasi di calcolo.

Il cedimento misurato a termine fine costruzione, pari a 33 cm circa, verrà sanato durante la messa in opera del rilevato stesso.



**Figura 11.4: NV34 – Spostamenti verticali in corrispondenza dell’asse del rilevato**





**Figura 11.5: NV34 – Spostamenti verticali in corrispondenza della base del rilevato**

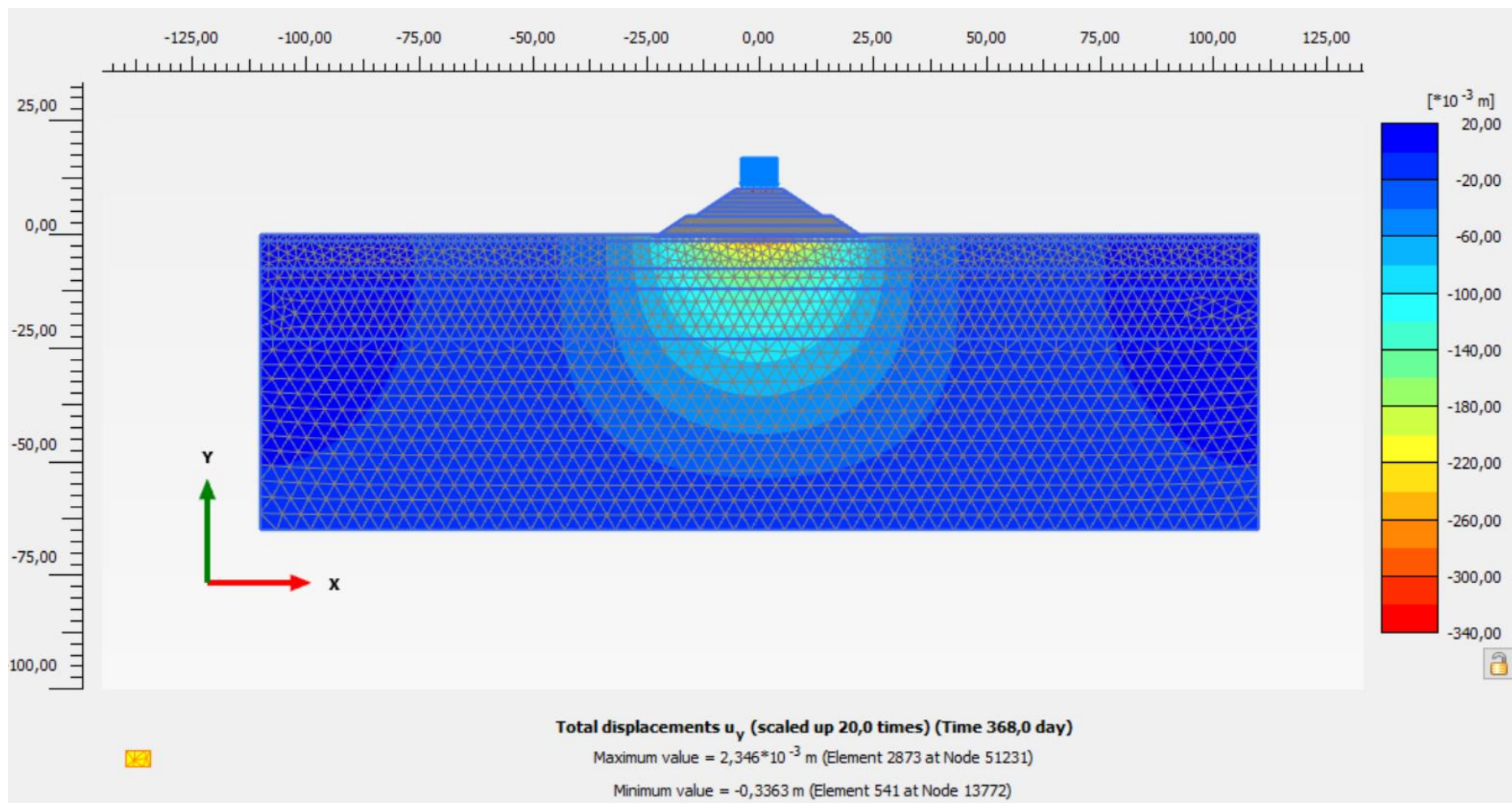
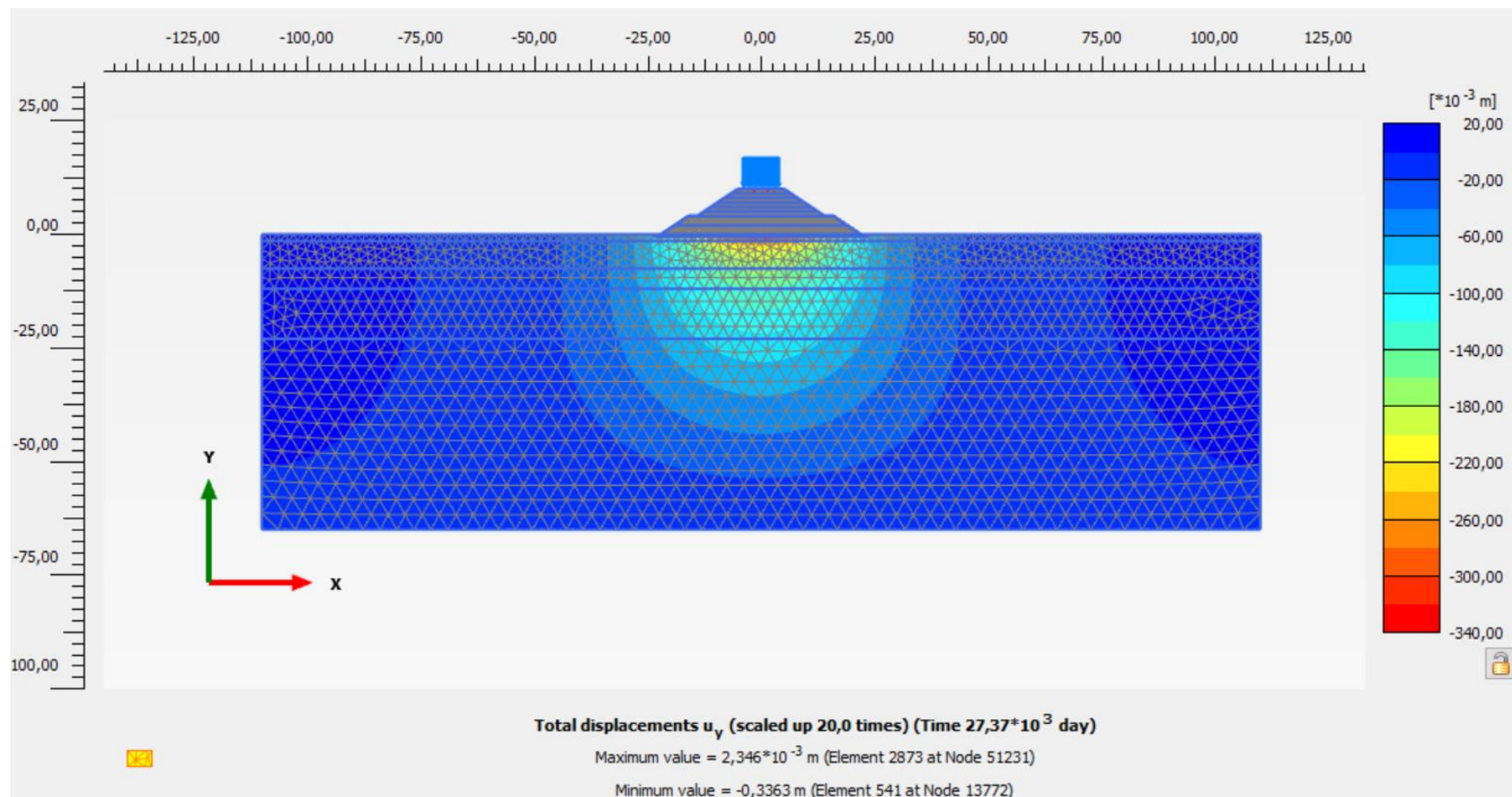


Figura 11.6: NV34 – Spostamenti verticali termine costruzione



**Figura 11.7: NV34 – Spostamenti verticali lungo termine**

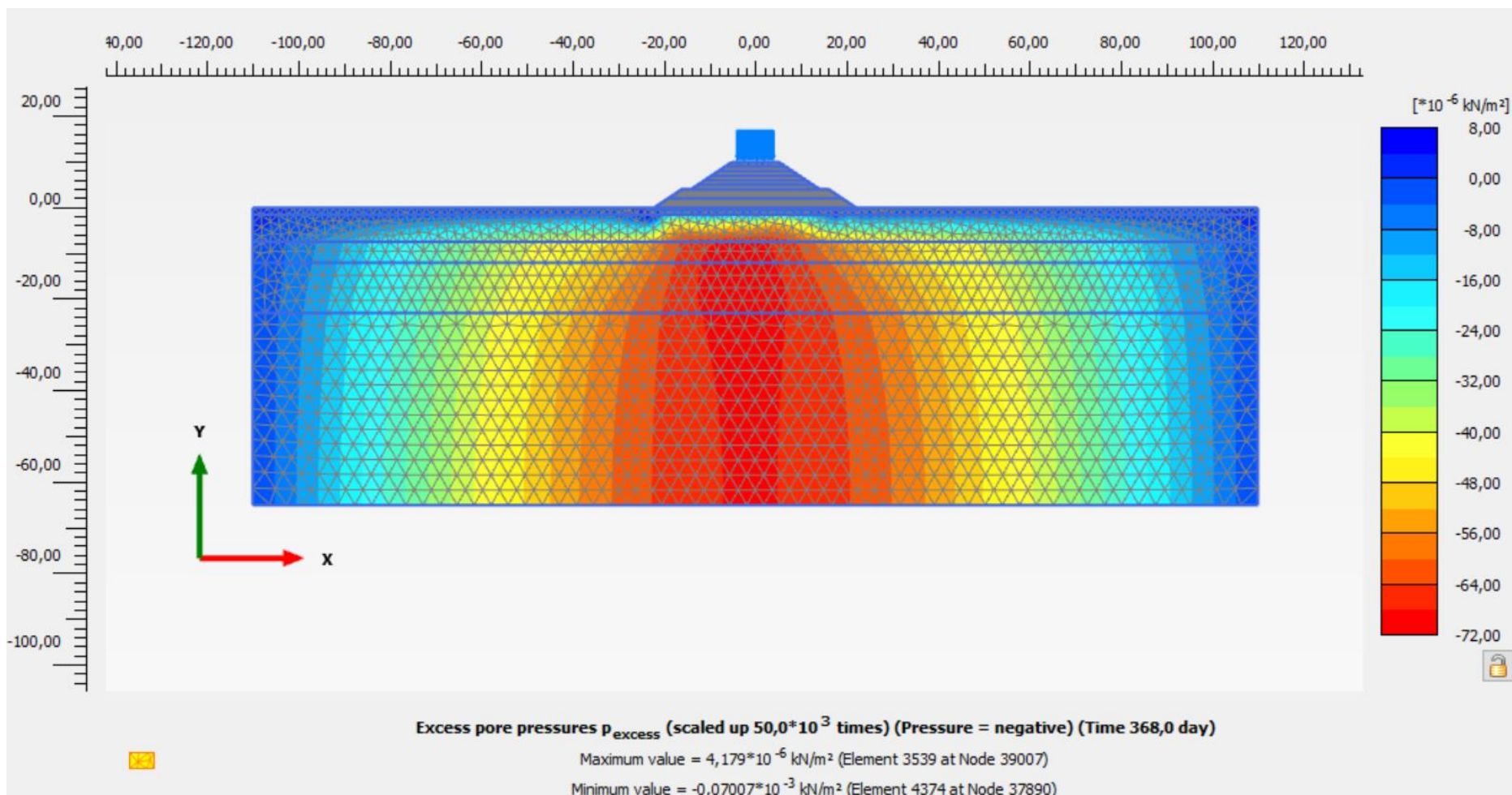


Figura 11.8: NV34 – Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  termine costruzione

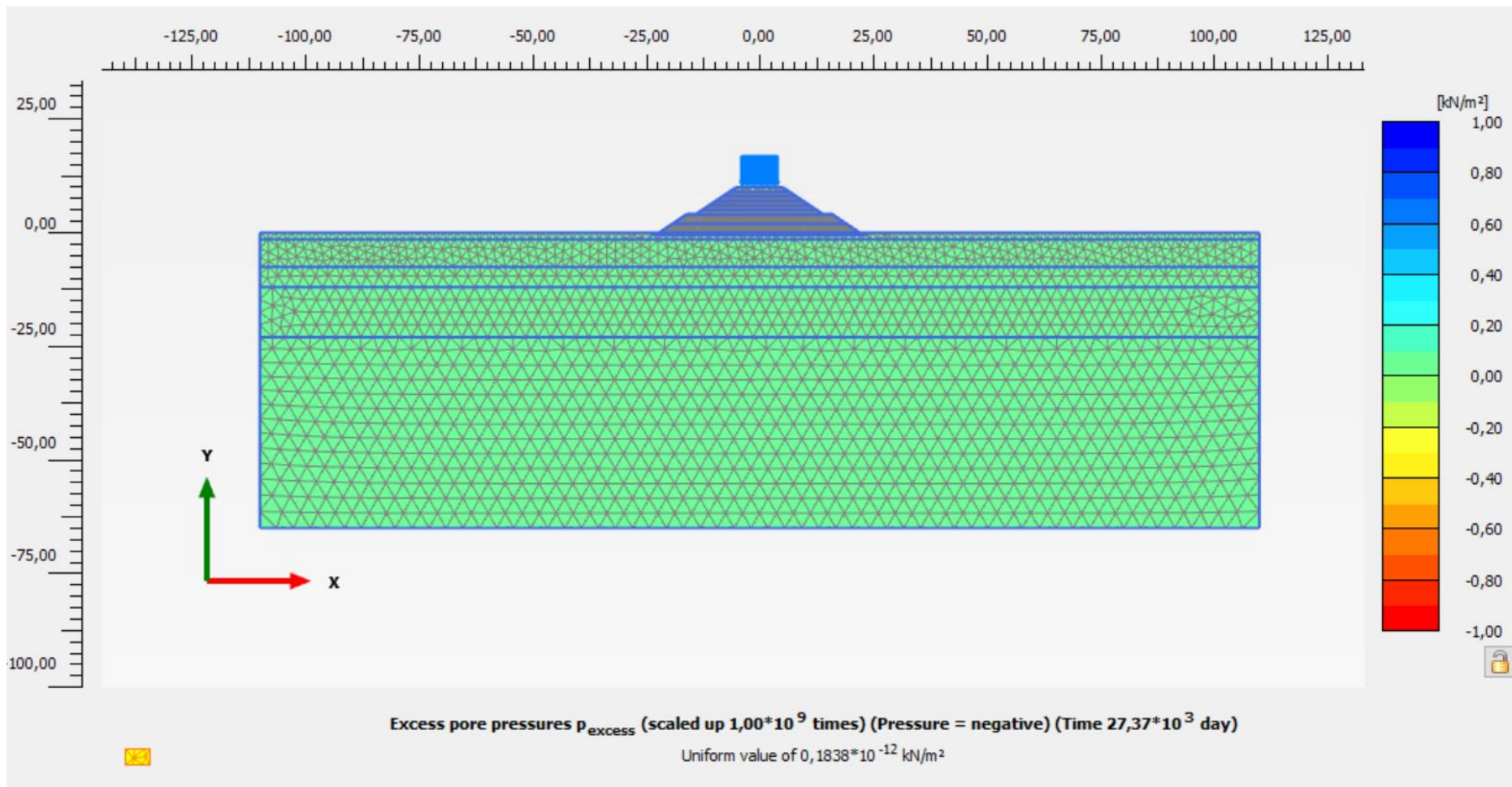


Figura 11.9: NV34 – Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  lungo termine