

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP J31H03000180008

DIREZIONE TECNICA
S.O.: OPERE GEOTECNICHE

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA DI 2^A FASE

NPP 0258 - GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA

GEOTECNICA
Relazione di predimensionamento Rilevati e Scatolari

SCALA:

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

NR4E 21 R 11 RH GE0006 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione per CSLLPP	A.Rotunno	Febbraio 2022	G. Scasserra	Febbraio 2022	T. Paoletti	Febbraio 2022	L. Berardi Febbraio 2021

File: NR4E21R11RHGE0006001A.docx

n. Elab.:

INDICE

1. PREMESSA	4
2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	5
2.1 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO	5
2.2 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO E DI BASE.....	5
2.3 SOFTWARE.....	6
3. DESCRIZIONE DEL TRACCIATO	7
4. CRITERI DI VERIFICA IN ACCORDO ALLE NTC2018	8
4.1 GENERALE	8
4.2 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI.....	9
4.2.1 <i>Verifiche Stati Limite Ultimi (SLU)</i>	9
4.2.2 <i>Verifiche Stati limite di esercizio (SLE)</i>	11
4.3 STABILITÀ DEL SITO NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE	12
4.4 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI	13
4.4.1 <i>Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche</i>	13
4.4.2 <i>Verifiche Stati limite ultimi (SLU)</i>	14
4.4.3 <i>Stati limite di esercizio (SLE)</i>	15
5. COEFFICIENTI SISMICI PER LE VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE	16
6. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA	17
6.1 CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI.....	17
6.1.1 <i>Slope/W</i>	17
6.1.2 <i>Plaxis 2D</i>	17
6.2 METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE	17
6.2.1 <i>Verifiche di stabilità</i>	17
6.2.2 <i>Valutazione degli spostamenti</i>	18
7. CALCOLO DEI CEDIMENTI SECONDARI	18

8. CARATTERISTICHE DEL CORPO FERROVIARIO	21
8.1 GEOMETRIA DEI RILEVATI FERROVIARI	21
8.2 MATERIALI E PARAMETRI GEOTECNICI	21
8.3 CARICHI DI PROGETTO	22
8.3.1 Carichi ferroviari per le Verifiche SLU.....	23
8.3.2 Carichi ferroviari per le Verifiche SLE.....	24
9. SELEZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO.....	25
10. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 2+750	26
10.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO	26
10.2 CARICHI DI PROGETTO	28
10.3 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI	29
10.3.1 Modelli e fasi di calcolo.....	29
10.3.2 Risultati	32
11. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 3+000	40
11.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO	40
11.2 CARICHI DI PROGETTO	42
11.3 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI	43
11.3.1 Modelli e fasi di calcolo.....	43
11.3.2 Risultati	46

1. PREMESSA

Con riferimento a quanto indicato nella Relazione Geotecnica Generale (NR4E21R11GEGE0006001A) e dettagliato nella Relazione Generale (NR4E21R05RGMD0001001A), il presente documento riporta le verifiche geotecniche di predimensionamento, ai sensi della Normativa vigente (NTC 2018), relative alle sezioni caratteristiche dei tratti in rilevato e degli scatolari previsti nell'ambito del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica del lotto in esame.

La relazione si articola come segue:

- il capitolo 2 elenca i documenti, le normative e la bibliografia di riferimento;
- il capitolo 3 riporta una breve descrizione del tracciato in esame;
- 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 una descrizione del metodo impiegato per il calcolo dei cedimenti associati alla consolidazione secondaria dei terreni coesivi e i valori dei parametri di input adottati nel calcolo di tali cedimenti;
- il capitolo 8 riporta la descrizione del corpo ferroviario in esame da un punto di vista geometrico, le caratteristiche geotecniche dei materiali costituenti il rilevato e i sovraccarichi presenti;
- il capitolo 9 riporta una breve descrizione delle sezioni analizzate;
- i capitoli 10 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.

2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO

- [1] 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.
- [2] Circolare del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 21 gennaio 2019, n. 7 del Consiglio superiore dei Lavori Pubblici recante “Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”
- [3] RFI DTC SI MA IFS 001 C del 21.12.2018- “MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI”.
- [4] RFI DTC INC CS LG IFS 001 A del 21.12.2011 – “Linee guida per il collaudo statico delle opere in terra”.
- [5] 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.
- [6] 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”
- [7] 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
- [8] UNI EN 1997-1: Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali
- [9] UNI EN 1998-5: Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

2.2 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO E DI BASE

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

- [10] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord - – Carte Geologiche (Doc. NR4E00R69L5GE0001001A-2A-3A)
- [11] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord - – Profili geologici – (Doc. NR4E00R69L5GE0001001A-2A-3A)

- [12] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord – Relazione Geotecnica generale (Doc. Rif. NR4E21R11GE0006001A)
- [13] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord – Profilo geotecnico (Doc. Rif. NR4E21R11F6GE0006001A)
- [14] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord – Relazione suscettibilità alla liquefazione (Doc. Rif. NR4E21R11GE0006002A)
- [15] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord – Relazione di predimensionamento fondazioni e opere provvisionali Viadotti (Doc. Rif. NR4E21R09CLVI0002001A)

2.3 SOFTWARE

- [16] Slope\W – GeoStudio 2017 (Versione 7.23) – Geo-Slope International ([http:// www.geo-slope.com](http://www.geo-slope.com))
- [17] PLAXIS B.V.. “Plaxis – Finite Element Code for Soil and Rock Analyses”. Plaxis 2D – 2019. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherland. ([http:// w.plaxis.nl](http://w.plaxis.nl))


3. DESCRIZIONE DEL TRACCIATO

Il progetto prevede il completamento della Stazione di Tor Di Quinto con l'inserimento delle nuove comunicazioni per realizzare la configurazione di progetto che prevede due binari di corsa e un binario di precedenza di modulo 250 m, e il proseguimento della nuova infrastruttura fino alla fermata di Val D'Ala, che sarà trasformata in stazione.

In uscita da Tor Di Quinto e superata la galleria artificiale per il sovrappasso della linea Roma – Civitacastellana – Viterbo, la nuova coppia di binari, che già si trova a quota 30 m (+ 16 m circa dal pc) procede in viadotto fino al superamento del fiume Tevere.

Il viadotto si sviluppa per circa 450 m ed è costituito da 10 campate, mentre l'attraversamento del Tevere avviene un ponte ad arco in acciaio a via inferiore a doppio binario di lunghezza L=120 m

Dopo l'attraversamento del fiume Tevere, dal km 2+730 ca al km 3+000 ca la linea è prevista su scatolare con larghezza variabile da 14 m ca. a 33 m ca (sullo scatolare di larghezza maggiore sarà collocato anche il ramo smistamento della ferrovia) fino al collegamento con un nuovo viadotto che copre gran parte della linea fino alla stazione Val d'Ala (con l'eccezione di un breve tratto tra il km 3+795 e il km 3+893, dove è previsto uno scatolare, e della parte finale della linea verso Val d'Ala che si sviluppa in rilevato).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA					
	GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD					
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 8 di 54

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. [1]):

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

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

$$E_d \leq R_d \quad (\text{Eq. 6.2.1 del Doc. Rif. [1]})$$

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. [1]).

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


$$E_d \leq C_d \quad (\text{Eq. 6.2.7 del Doc. Rif. [1]})$$

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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA					
	GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD					
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 9 di 54

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. [1]):

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. [1]).

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. [2]), calcolata sulla base delle azioni di progetto, dei parametri di progetto e della geometria di progetto ($R = R \left[\gamma_F \cdot F_k; \frac{X_k}{\gamma_m}; a_d \right]$).

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

Facendo riferimento a quanto previsto al p.to 3.5.2.3.8 del Manuale di Progettazione RFI DINIC MA CS 00 001 C, parte IV (Doc. Rif. [3]), 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. [1]) e i coefficienti di combinazione ψ definiti in Tabella 4.2 e Tabella 4.3 (Tab. 5.2.VI e Tab. 5.2. VII del Doc. Rif. [1]).

Tabella 4.1: Coefficienti parziali sulle azioni (Tab. 6.2.I del Doc. Rif. [1])

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

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

⁽¹⁾ 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 γ_{Gi}

In Tabella 4.1 (Tab. 5.2.V del Doc. Rif. [1]) il significato dei simboli è il seguente:

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

γ_{G2} = coefficiente parziale dei pesi propri degli elementi non strutturali;

γ_{Qi} = coefficiente parziale delle azioni variabili.

Tabella 4.2: Coefficienti di combinazione ψ delle azioni (Tab. 5.2.VI del Doc. Rif. [1])

Tab. 5.2.VI - Coefficienti di combinazione Ψ delle azioni

Azioni		ψ_0	ψ_1	ψ_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 ⁽²⁾	0,80 ⁽¹⁾	0,0
Gruppi di	gr_2	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽¹⁾	-
carico	gr_3	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽¹⁾	0,0
	gr_4	1,00	1,00 ⁽¹⁾	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

⁽¹⁾ 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.

⁽²⁾ Quando come azione di base venga assunta quella del vento, i coefficienti ψ_0 relativi ai gruppi di carico delle az


 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA					
	RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A

Tabella 4.3: Coefficienti di combinazione ψ delle azioni (Tab. 5.2.VII Doc. Rif. [1])

Tab. 5.2.VII - Ulteriori coefficienti di combinazione ψ delle azioni

	Azioni	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Azioni singole da traffico	Treno di carico LM 71	0,80 ⁽³⁾	⁽¹⁾	0,0
	Treno di carico SW /0	0,80 ⁽³⁾	0,80	0,0
	Treno di carico SW/2	0,00 ⁽³⁾	0,80	0,0
	Treno scarico	1,00 ⁽³⁾	-	-
	Centrifuga	⁽²⁾ ⁽³⁾	⁽²⁾	⁽²⁾
	Azione laterale (serpeggio)	1,00 ⁽³⁾	0,80	0,0

⁽¹⁾ 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.

⁽²⁾ Si usano gli stessi coefficienti ψ adottati per i carichi che provocano dette azioni.

⁽³⁾ Quando come azione di base venga assunta quella del vento, i coefficienti ψ_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. [1])

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

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

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

COEFFICIENTE	R2
γ_R	1,1

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. [1]), che gli spostamenti dell'opera in esame e del terreno circostante siano compatibili con la funzionalità della struttura e con la sicurezza e la funzionalità di manufatti adiacenti.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA					
	GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD					
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 12 di 54

Nello specifico, come riportato nei Doc. Rif. [3], RFI stabilisce un valore soglia degli spostamenti residui attesi, corrispondenti ad uno Stato Limite di Esercizio (s_{SLE}), pari a 5 cm.

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 $qc_{1N} > 180$ dove $(N1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche SPT normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e qc_{1N} 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. [14] 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 sulla suscettibilità alla liquefazione (Doc. Rif. [14]); in sintesi risulta che il rischio di liquefazione è trascurabile nella tratta in esame.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA					
	GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD					
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 13 di 54

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. [1]) 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. [1]:

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

La Tabella 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. [2]).


 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA					
	GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD					
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 14 di 54

Tabella 4.6: Verifiche di sicurezza in funzione della Classe d'uso (Tab. C7.3.I, Doc. Rif. [2])

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. [2], 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. [1]). Per l'opera in oggetto, le verifiche agli Stati Limite Ultimi verranno condotte con riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (**SLV**).

Le verifiche di sicurezza agli SLU in campo sismico devono contemplare almeno le medesime verifiche definite in campo statico. In particolare, la stabilità globale in condizioni sismiche delle opere in materiali

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA					
	GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD					
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 15 di 54

sciolti, quali rilevati, deve essere svolta impiegando lo stesso approccio di cui al par. 6.8.2 del Doc. Rif. [1], 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. [1]).


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. [1] 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**).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA					
	GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD					
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 16 di 54

5. COEFFICIENTI SISMICI PER LE VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE

Come descritto al Par. C7.11.4 del Doc. Rif. [2] , 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. [1]), 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. [10]), qui
- β_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito. Come chiarito al Par. 7.11.4 del Doc. Rif. [1] il valore del coefficiente β_s da assumere per verifiche allo SLV su fronti di scavo o rilevati, è pari a $\beta_s = 0.38$.

In accordo alle espressioni di cui sopra, si ottengono i seguenti coefficienti per la verifica di stabilità globale allo SLV (Tabella 5.1):

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

Sezione di calcolo	a_{\max} (g) (*)	k_H	k_V
km 0+500	0.180	0.068	± 0.034
km 0+700	0.199	0.077	± 0.038
(*) valori in corrispondenza dei punti P6 e P10 definiti nel Doc. Rif. [10]			

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA					
	GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD					
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 17 di 54

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. 7.23 - 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 2019.

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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA					
	GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD					
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 18 di 54

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.

Nelle analisi sono state escluse, perché considerate non significative, le superfici di rottura corticali (con profondità minori di 1m ca.), o interne al rilevato ferroviario. A tal proposito si sottolinea che, nei calcoli, a favore di sicurezza, non è stato preso in conto in alcun modo l'effetto che la finitura a verde delle scarpate darà necessariamente, in termini di coesione efficace, allo strato più superficiale delle scarpate, né il pacchetto di sovrastruttura ferroviaria che contribuisce anch'esso ad incrementare la resistenza allo scivolamento nella porzione di meccanismo che attraversa tali materiali.

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.

Per i dettagli del calcolo dei cedimenti attraverso il codice Plaxis 2D (scelta dei modelli costitutivi adottati per i terreni e relativi parametri di input) si rimanda ai capitoli specifici per le varie sezioni. Attraverso questo calcolo è stato possibile ripercorrere la storia tensio-deformativa del sistema rilevato-terreno di fondazione o scatolare-terreno di fondazione e valutare lo sviluppo nel tempo dei cedimenti di consolidazione primaria dovuti alla costruzione dei nuovi rilevati/scatolari.

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

7. CALCOLO DEI CEDIMENTI SECONDARI

I cedimenti secondari, dovuti alle deformazioni differite nel tempo, sono stati valutati a parte e aggiunti ai cedimenti da consolidazione primaria valutati dalle analisi di interazione-terreno struttura.

Il contributo del cedimento secondario è stato valutato tenendo conto degli incrementi tensionali indotti dalla realizzazione delle opere in progetto. In particolare, si è tenuto conto di:

- Valutazione del tempo di inizio cedimento secondario come istante in cui si è sviluppato il 95% del cedimento primario; considerando che per tutte le sezioni analizzate il cedimento primario si esaurisce entro fine costruzione dell'opera, il cedimento secondario è stato valutato per un intervallo temporale a partire da 1 anno fino a 20 anni dalla messa in esercizio della linea ferroviaria;
- Definizione dello spessore di materiale interessato dal cedimento secondario valutato in base alla profondità a cui l'incremento tensionale rispetto alla situazione attuale non eccede il 10%.

Risulta quindi, applicando la formula semplificata di cui sotto:

$$s_s = \sum_{i=1}^n \log\left(\frac{t}{t_{100,i}}\right) c_{\alpha\epsilon,i} h_i$$

Dove:

s_s = cedimento secondario;

t = tempo generico finale a partire dall'applicazione del carico a cui si intende valutare il cedimento secondario; nel caso in esame $t = 20$ anni;

$t_{100,i}$ = tempo di inizio cedimento secondario, valutato come descritto sopra;

h_i = spessore dello strato interessato dal cedimento secondario;

n = numero di strati di terreno interessati dal cedimento secondario; nel caso in esame $n = 1$;

$c_{\alpha\epsilon,i}$ = indice di consolidazione secondaria (vedi Tabella 7.1).

Il coefficiente di consolidazione secondaria $c_{\alpha\epsilon}$ è stato valutato sulla base dei risultati delle prove edometriche disponibili (si veda il par. 9.4.4.3 del Doc. Rif. [10]).

Tabella 7.1: Coefficienti di consolidazione secondaria

Unità geotecnica	$c_{\alpha\epsilon}$	
	[-]	[%]
AL1	0.003	0.3

I valori di cedimento da consolidazione secondaria valutati con la metodologia descritta sopra sono riportati nei capitoli specifici per le varie sezioni di calcolo. La stima del cedimento secondario effettuata



PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD

TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA

**RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI
E SCATOLARI**

COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 20 di 54
------------------	----------------	----------------	------------------------	-----------	--------------------

come dettagliato sopra è molto cautelativa, in quanto si presume che tutto lo strato interessato da incremento di carico significativo, stimato peraltro al di sotto del punto più caricato (asse rilevato), abbia tutto le stesse caratteristiche del campione su cui è stata effettuata la prova edometrica. Si presume quindi che in realtà i cedimenti secondari possano essere inferiori a quanto stimato, anche se la compressibilità secondaria andrà comunque opportunamente indagata nelle successive fasi progettuali.

8. CARATTERISTICHE DEL CORPO FERROVIARIO

8.1 GEOMETRIA DEI RILEVATI FERROVIARI

Per quanto riguarda la geometria dei rilevati, si è fatto riferimento agli elaborati di progetto ad essi relativi ed in particolare alle sezioni trasversali, tipologiche e correnti.

In particolare, i rilevati sono previsti con pendenza 3H:2V e con la realizzazione di una banca intermedia, di larghezza pari a 2m, dove l'altezza dei rilevati supera i 6m misurati a partire dal ciglio superiore del rilevato. Al di sotto del rilevato è stato previsto uno scotico per uno spessore pari a 0.5 m.

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

8.2 MATERIALI E PARAMETRI GEOTECNICI

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

Tabella 8.2, nelle quali si distingue rispettivamente il rilevato di progetto dal rilevato esistente.

Come anticipato nei paragrafi precedenti, l'inerbimento superficiale, ma anche lo strato di super compattato ed il sub-ballast, sono stati cautelativamente modellati con lo stesso materiale del rilevato. Il ballast, le traversine e l'armamento sono stati modellati come sovraccarichi permanenti (si veda paragrafo 8.3).

Tabella 8.1: Parametri geotecnici di calcolo – materiali costituenti i rilevati – Modello Mohr-Coulomb

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

Tabella 8.2: Parametri geotecnici di calcolo – materiali costituenti i rilevati – Modello Hardening Soil

STRATO	Spessore	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Moduli di Young modello Hardening Soil			m	Permeabilità
	[m]	γ_d	ϕ'_k	ϕ'_d	c'_k	c'_d	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}		k
		[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[m/s]
RILEVATO ESISTENTE	Variabile	20	35	29.3	0	0	20.2	20.2	60.5	0.01	1×10^{-5}

8.3 CARICHI DI PROGETTO

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

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

L'armamento ferroviario è stato schematizzato, in accordo a quanto riportato al par 5.2.2.1. del Doc. Rif. [1] e nel Doc. Rif. [3], per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14.4 kPa, rappresentativo di uno strato di spessore pari a circa 0.80 m con un peso pari a 18 kN/m³. Il carico è stato applicato sulla sommità del rilevato o all'estradosso dello scatolare per una larghezza complessiva di circa 9 m.

Per la definizione del sovraccarico da traffico ferroviario si sono valutate le pressioni equivalenti dovute sia al treno per traffico normale LM71 sia per quello da traffico pesante SW/2, secondo quanto definito sia dalle NTC2018 (punti 5.2.2.2.1.1 e 5.2.2.2.1.2. del Doc. Rif. [1]) sia dal "MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI" (RFI DTC SI MA IFS 001 C del 21.12.2018 , Doc. Rif. [3]).

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

- il carico dato dal treno LM71 risulta essere pari a 250 kN ad asse, con interasse pari a 1.6 m, (ossia $250/1.6 = 156.25$ kN/m);
- per riportare il carico ferroviario dalla traversina, di larghezza pari a 2.4 m, al piano al di sotto dell'armamento si è considerata una diffusione con pendenza a 45°. Dato che la linea in esame è a doppio binario, la pressione equivalente è stata valutata come $(156.25 \times 2)/7.1 = 44$ kPa, dove 7.1

m è la larghezza delle due vie di corsa in corrispondenza del piano al di sotto dell'armamento, considerando una diffusione con pendenza a 45°;

- la pressione sopracitata è stata amplificata, sempre in base a quanto indicato dal Doc. Rif. [3], con un coefficiente α pari a 1.1 nel caso di modello di carico LM71, pertanto il valore di pressione risultante è pari a 48.4 kPa.

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

- il carico dato dal treno SW/2 risulta essere pari a 150 kN/m;
- in modo analogo a quanto detto sopra per riportare il carico ferroviario dalla traversina, di larghezza pari a 2.4 m, al piano al di sotto dell'armamento si è considerata una diffusione con pendenza a 45°. Pertanto, la pressione equivalente è pari a $(150 \times 2)/7.1 = 42$ kPa, da amplificarsi con un coefficiente α pari a 1. Il valore di pressione risultante è quindi pari a 42 kPa.

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

Per il tipo di traffico caratterizzante la linea, sulla base di quanto indicato nel Doc. Rif. [7], si è assunto un coefficiente di amplificazione α pari a 1.1. Pertanto, il valore di pressione risultante è pari a 48.4 kPa.

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 e di combinazione come previsti dalla Normativa vigente. Nei successivi paragrafi, i carichi ferroviari applicati nelle diverse verifiche in accordo a quanto previsto dalla Normativa vigente sono riportati nel dettaglio.

8.3.1 Carichi ferroviari per le Verifiche SLU

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

- Il carico del pacchetto di armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14.4 kPa su una lunghezza di circa 9m. Tale carico è di tipo permanente sfavorevole, pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 4.1, il valore di calcolo assunto è pari a:

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

- Il carico da traffico ferroviario (q), assunto pari a 48.4 kPa, è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita applicata in corrispondenza delle impronte delle traversine ferroviarie. Tale sovraccarico è di tipo variabile/sfavorevole, pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 4.1, il valore di calcolo è stato assunto pari a:

$$q_d = q_k \times \gamma_{Qi [A2]} = 48.4 \text{ kPa} \times 1.3 = 63 \text{ kPa.}$$

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

- Il carico del pacchetto di armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14.4 kPa su una lunghezza di circa 9m. Tale carico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico in accordo a quanto specificato dalle NTC 2018 (si veda Par.7.11.1 del Doc. Rif. [1]) che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:

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


- Il carico da traffico ferroviario (q), assunto pari a 48.4 kPa, è moltiplicato per un coefficiente $\psi = 0.2$ in accordo a Doc. Rif. [1] ed è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita applicata in corrispondenza delle impronte delle traversine ferroviarie. Tale sovraccarico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico in accordo a quanto specificato dalle NTC 2018 (vedasi Par.7.11.1 del Doc. Rif. [1]) che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:

$$q_d = 0.2q_k = 9.7 \text{ kPa.}$$

8.3.2 Carichi ferroviari per le Verifiche SLE

Nel calcolo dei cedimenti sono stati considerati i seguenti carichi

- Il carico del pacchetto di armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14.4 kPa su una lunghezza di circa 9m. Tale carico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico in accordo a quanto specificato dalle NTC 2018, pertanto:
- $$q_d = q_k = 14.4 \text{ kPa.}$$
- viene omissso nell'analisi il sovraccarico da traffico ferroviario in accordo a quanto specificato in Doc. Rif. [3].

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA					
	GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD					
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 25 di 54

9. SELEZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO

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

- **Sezione al km 2+750** in prossimità del Bivio Tor di Quinto all'inizio del Ramo Smistamento. In questo tratto la linea si sdoppia e i due rami proseguono in viadotto. La soluzione progettuale scelta per questo tratto comprende uno scatolare a sezione variabile;
- **Sezione al km 3+000** in prossimità del Bivio Tor di Quinto appena prima del tratto in viadotto. A questa progressiva la linea comprende il Ramo Smistamento e il ramo che prosegue verso la Stazione Val d'Ala, in affiancamento. Per questa sezione sono state studiate le stesse soluzioni progettuali descritte per la sezione al km 2+750; per la sezione scatolare è stato previsto un setto centrale data la notevole larghezza della sezione (circa 33m) per limitare la freccia della soletta superiore a valori accettabili.

Per le sezioni citate sono state svolte solo le verifiche dei cedimenti in quanto, data la geometria della sezione, la stabilità globale è ritenuta intrinsecamente soddisfatta.

Nel seguito sono riportate le verifiche relative alle sezioni individuate, per le quali sono state definite le stratigrafie di riferimento ed i relativi parametri geotecnici di progetto in accordo a quanto riportato nella Relazione Geotecnica generale (Doc. Rif. [10]).

10. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 2+750

10.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

In Figura 10.1 si riporta uno stralcio del Profilo geotecnico (Doc. Rif. [13]) in cui è indicata l'ubicazione della sezione di calcolo lungo il tracciato e la stratigrafia in corrispondenza della stessa. In accordo a quanto riportato nella Relazione Geotecnica generale (Doc. Rif. [10]) e sulla base di quanto descritto nel capitolo 4, nella Tabella 10.1 e

Tabella 10.2 sono riportati la stratigrafia ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto, fattorizzati utilizzando i coefficienti M2 riportati nella Tabella 4.4 della presente relazione.

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

Si ricorda che, come definito al capitolo 7 del Doc. Rif. [1], 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.

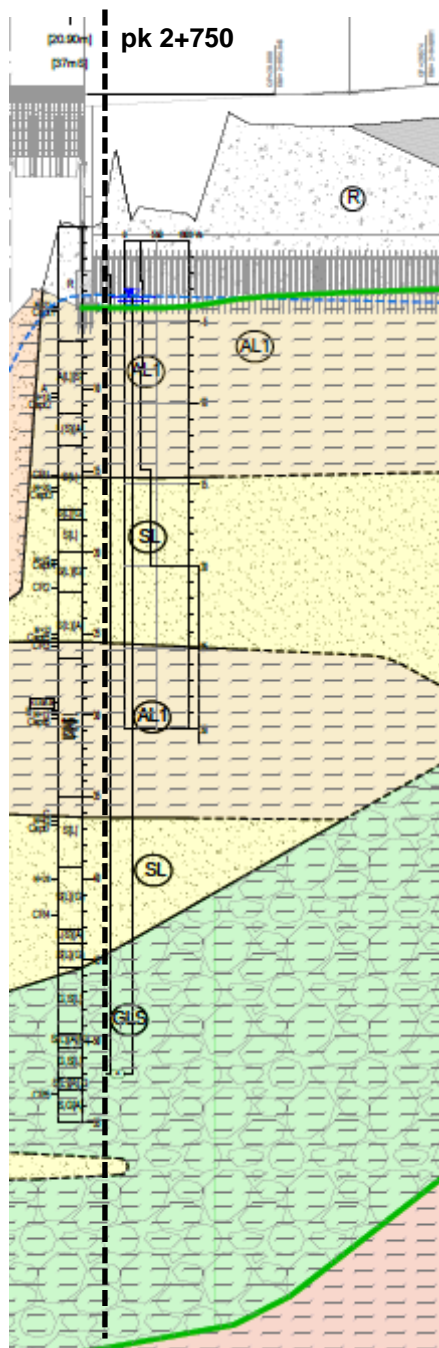


Figura 10.1: Stralcio del Profilo geotecnico in corrispondenza della sezione al km 2+750

Tabella 10.1: Stratigrafia di calcolo per la sezione 2+750

Strato	Profondità da [m da p.c.]	Profondità a [m da p.c.]	Descrizione
R	0	5	Materiale rimaneggiato assimilabile a riporto antropico costituito principalmente da sabbia eterometrica limosa e/o limo sabbioso, ma talvolta argilla limosa con locali frammenti di laterizi e inclusi tufacei e sporadiche ghiaie.
AL1	5	15.4	Argilla limosa e limo argilloso debolmente sabbioso/limo sabbioso debolmente argilloso. Presenti livelli millimetrici sabbiosi e rare intercalazioni ghiaiose. Rare tracce di materiale organico.
SL	15.4	25.6	Sabbia da debolmente limosa a con limo, talvolta ghiaiosa. Rare tracce di materiale organico.
AL1	25.6	36.3	Argilla limosa e limo argilloso debolmente sabbioso/limo sabbioso debolmente argilloso. Presenti livelli millimetrici sabbiosi e rare intercalazioni ghiaiose. Rare tracce di materiale organico.
SL	36.3	44.7	Sabbia da debolmente limosa a con limo, talvolta ghiaiosa. Rare tracce di materiale organico.
GLS	44.7	68.8	Ghiaia poligenica eterometrica con sabbia debolmente limosa e/o sabbia con ghiaia debolmente argillosa.
AL3	68.8	-	Argilla limosa con livelli da centimetrici a decimetrici di sabbia fine. Presenti tracce di materiale organico.

Tabella 10.2: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 2+750 – Materiali in sito

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Resistenza al taglio non drenata	
	γ_d	ϕ'_k	ϕ'_d	c'_k	c'_d	c_u	c_u
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
R	18.5	28.5	23.5	0	0	-	-
SL	19	31	25.7	0	0	-	-
GLS	19	33	27.5	0	0	-	-
AL1	19	27	22.2	5	4	50 fino a 25 m da pc; 70 oltre 25 m da pc.	36 fino a 25 m da pc; 50 oltre 25 m da pc.
AL3	20	28	23	15	12	300	214

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli ad una quota di circa 3.9 m dal piano campagna.

10.2 CARICHI DI PROGETTO

Per il dettaglio dei carichi di progetto del pacchetto di armamento ferroviario e del carico da traffico assunti per le verifiche SLE si faccia riferimento a quanto riportato nel paragrafo 8.3.2.

10.3 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

10.3.1 Modelli e fasi di calcolo

Il modello utilizzato per queste analisi è mostrato nella Figura 10.2 e rappresenta lo scatolare alla progressiva 2+750. Lo scatolare ha un'altezza di 9 m e una larghezza di 14 m circa; il pacchetto di armamento ferroviario (ballast, traversine e rotaie) è modellato nelle analisi come sovraccarico distribuito sulla soletta superiore dello scatolare.

Per il calcolo dei cedimenti si sono impiegati i seguenti modelli costitutivi per i terreni, implementati all'interno del codice di calcolo Plaxis 2D:

- modello elasto-plastico con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb per l'unità geotecnica AL3;
- modello elasto-plastico con incrudimento "Modified Cam-Clay" per l'unità geotecnica AL1;
- modello elasto-plastico con incrudimento "Hardening Soil" per le unità geotecniche R, SL e GLS.

La stratigrafia di calcolo utilizzata è riportata in Tabella 10.1. In Tabella 10.3, Tabella 10.4 e Tabella 10.5 si riportano i valori dei parametri di input per i modelli costitutivi sopracitati.

Tabella 10.3: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 2+750 – Materiali in sito – Modello Mohr-Coulomb

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Resistenza al taglio non drenata		Modulo di Young operativo	Rapporto di Sovraconsolidazione	Permeabilità
	γ_d	ϕ'_k	ϕ'_d M2	c'_k	c'_d M2	c_u	c_u M2	$E_{op.}$	OCR	k
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[-]	[m/s]
AL3	20	28	23	15	12	300	214	60	-	1.0E-09

Tabella 10.4: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 2+750 – Materiali in sito – Modello Cam-Clay modificato

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Resistenza al taglio non drenata		Rapporto di Sovraconsolidazione	Indice dei vuoti iniziale	Rapporto di Compressione e Ricomprensione		Coefficiente di consolidazione secondaria	Permeabilità
	γ_d	ϕ'_k	ϕ'_d M2	c'_k	c'_d M2	c_u	c_u M2	OCR	e_0	C_c	C_r	$C_{\alpha s}$	k
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m/s]
AL1	19	27	22.2	5	4	50 fino a 25 m da pc; 70 oltre 25 m da pc.	36 fino a 25 m da pc; 50 oltre 25 m da pc	2.0 fino a 12 m da pc; 1 oltre 12 m da pc	0.85	0.27	0.05	0.003	1.0E-08

Tabella 10.5: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 2+750 – Materiali in sito – Modello Hardening Soil

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Moduli di Young modello Hardening Soil			m	Permeabilità
	γ_d	ϕ'_k	ϕ'_d	c'_k	c'_d	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}		k
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[m/s]
R	18.5	28.5	23.5	0	0	11.4	11.4	34.2	0.01	1.0E-07
SL	19	31	25.7	0	0	20 da 14.5 m da pc a 19.1 m da pc; 29.9 da 19.1 m da pc a 24.6 m da pc; 29.8 da 35.4 m da pc a 43.8 m da pc	20 da 14.5 m da pc a 19.1 m da pc; 29.9 da 19.1 m da pc a 24.6 m da pc; 29.8 da 35.4 m da pc a 43.8 m da pc	60 da 14.5 m da pc a 19.1 m da pc; 89.8 da 19.1 m da pc a 24.6 m da pc; 89.4 da 35.4 m da pc a 43.8 m da pc	0.01	1.0E-06
GLS	19	33	27.5	0	0	79.2	79.2	237.7	0.01	1.0E-05

Il modello implementato in Plaxis è bi-dimensionale (analisi *plane strain*) e include lo scatolare in sezione, con la propria geometria ed i sovraccarichi.

Per definire l'andamento dei cedimenti nel tempo viene omesso nell'analisi il sovraccarico da traffico ferroviario in accordo a quanto specificato in Doc. Rif. [3].

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- generazione dello stato tensionale iniziale geostatico;
- scavo e costruzione dello scatolare per una durata di 6 mesi;
- costruzione dell'armamento ferroviario sullo scatolare per una durata di 30 giorni e successiva consolidazione di 11 mesi fino alla messa in opera dello scatolare;
- consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio della linea ferroviaria per una durata di 6 mesi, 1 anno, 3 anni, 10 anni, 20 anni e 75 anni.

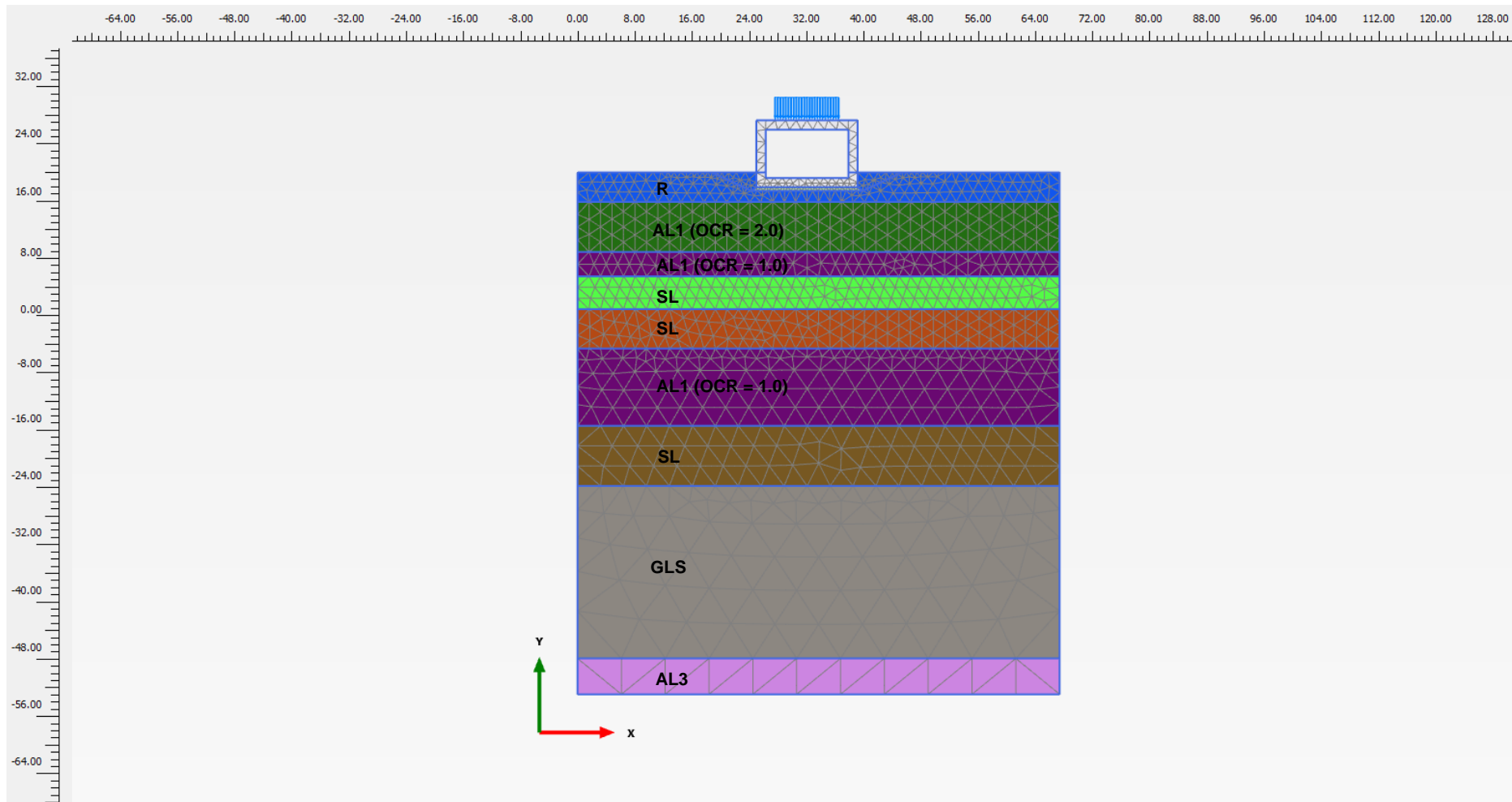



Figura 10.2: Modello Scatolare, sez. 2+750

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA					
	GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD					
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 32 di 54

10.3.2 Risultati

Con riferimento al Manuale di Progettazione RFI DINIC MA CS 00 001 C (parte IV), è necessario garantire che il cedimento residuo (differenza tra cedimento di lungo termine e cedimento a fine costruzione rilevato) sia inferiore a 5 cm.

In Figura 10.3 è riportato lo spostamento verticale u_y lungo una sezione verticale in corrispondenza dell'asse dello scatolare al termine delle seguenti fasi di calcolo:


- a breve termine;
- dopo 6 mesi dall'inizio della costruzione;
- dopo la posa dell'armamento ferroviario;
- a termine di tutte le fasi di costruzione dello scatolare e messa in opera (ovvero trascorso un anno dalla posa dell'armamento ferroviario);
- dopo 6 mesi dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 1 anno dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 3 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 10 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 20 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 75 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria.

In Figura 10.4 è riportato lo spostamento verticale u_y lungo una sezione orizzontale in corrispondenza della base dello scatolare al termine delle stesse fasi di calcolo.

Come mostrato nelle Figure Figura 10.3 e Figura 10.4, dopo 6 mesi dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria il cedimento coincide con il cedimento a lungo termine (75 anni), pertanto dopo 6 mesi dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria si verifica la totale dissipazione delle sovrappressioni interstiziali indotte dal carico (si vedano Figura 10.7 e Figura 10.8).

Il cedimento dovuto alla consolidazione secondaria è stato stimato tramite la metodologia descritta al cap. 7, per un intervallo temporale a partire da 1 anno fino a 20 anni dalla messa in esercizio della linea ferroviaria. Risulta, per la sezione in esame:

$$s_s = \sum_{i=1}^n \log\left(\frac{t}{t_{100,i}}\right) c_{\alpha\varepsilon,i} h_i = 4 \text{ cm}$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA					
	GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD					
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 33 di 54

Dove :

- s_s = cedimento secondario;
- t = tempo generico finale a partire dall'applicazione del carico a cui si intende valutare il cedimento secondario; nel caso in esame $t = 20$ anni;
- $t_{100,i}$ = tempo di inizio cedimento secondario, ovvero un anno a partire dalla messa in esercizio della linea ferroviaria;
- h_i = spessore dello strato interessato dal cedimento secondario, nel caso specifico $h_1 = 10.4$ m (strato AL1 superiore, in cui gli incrementi tensionali sono maggiori del 10% della tensione geostatica);
- n = numero di strati di terreno interessati dal cedimento secondario; nel caso in esame $n = 1$;
- $c_{\alpha\epsilon,i}$ = indice di consolidazione secondaria; nel caso in esame $c_{\alpha\epsilon} = 0.003$ per lo strato AL1.

Al termine della costruzione, quindi, il cedimento è pari a circa 24.3 cm, che coincide con il cedimento dopo 75 anni; i cedimenti residui da consolidazione primaria sono pertanto nulli. Ne consegue che i cedimenti residui sono dovuti alla sola consolidazione secondaria e pari a circa 4 cm e quindi inferiori al valore limite di 5 cm.

In Figura 10.5, Figura 10.6, Figura 10.7 e Figura 10.8 sono riportati i *contours* dei cedimenti totali a fine costruzione e a lungo termine e le sovrappressioni in eccesso per le stesse fasi di calcolo.

Alla luce di tali risultati, con i tempi di realizzazione sopra previsti, si ritiene che i cedimenti calcolati rispettino i criteri di ammissibilità sopra riportati. Data l'entità dei cedimenti e la velocità di dissipazione degli stessi, se tali valori fossero confermati nella successiva fase progettuale, si potrebbe valutare l'applicazione di un rilevato di precarica per un'altezza ed un tempo sufficienti per poter scontare la maggior parte dei cedimenti prima della messa in opera della struttura.

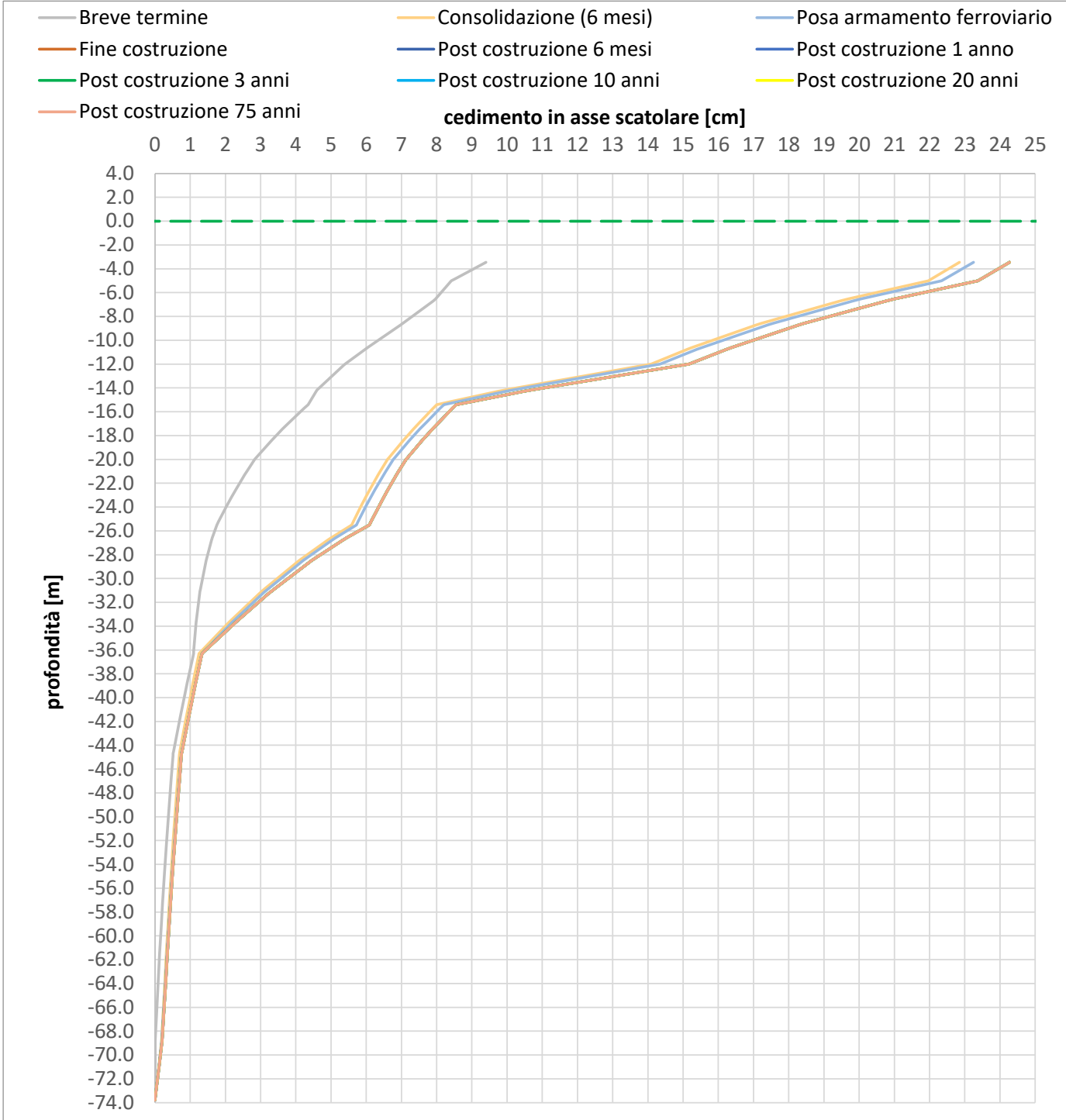


Figura 10.3: Scatolare sez. 2+750 – Spostamenti verticali in corrispondenza del centro della soletta di base dello scatolare

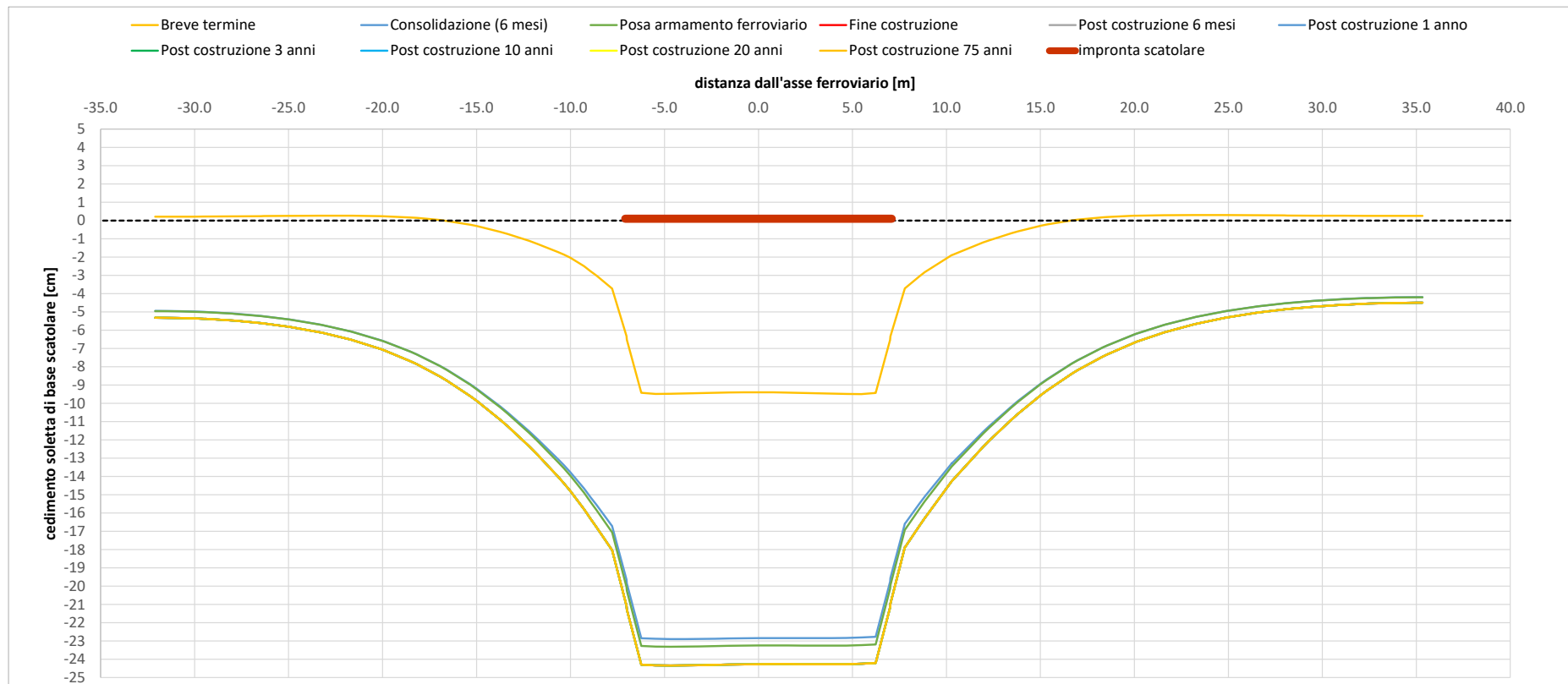


Figura 10.4: Scatolare sez. 2+750 – Spostamenti verticali in corrispondenza della soletta di base dello scatolare

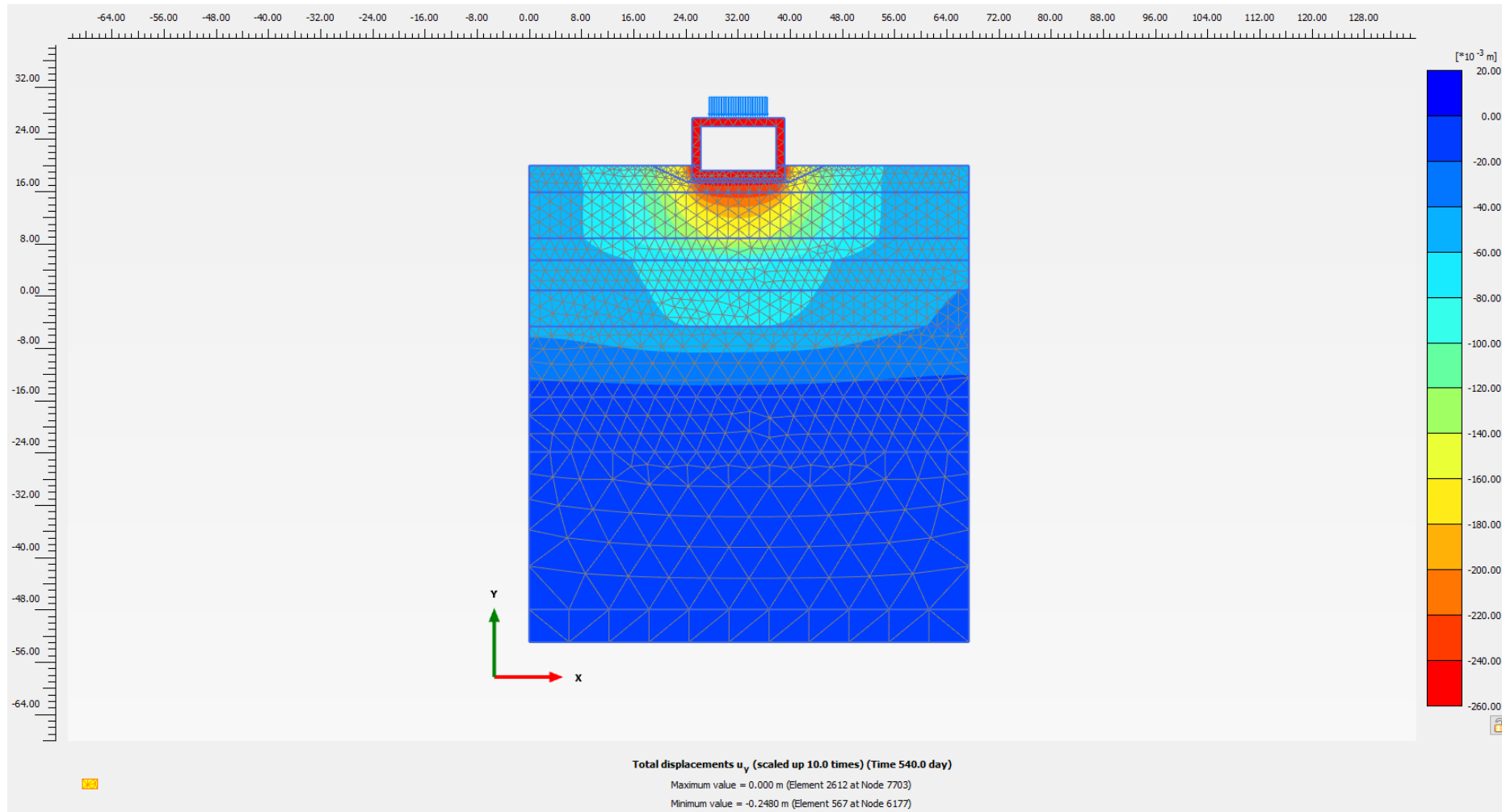


Figura 10.5: Scatolare sez. 2+750 – Spostamenti verticali termine costruzione

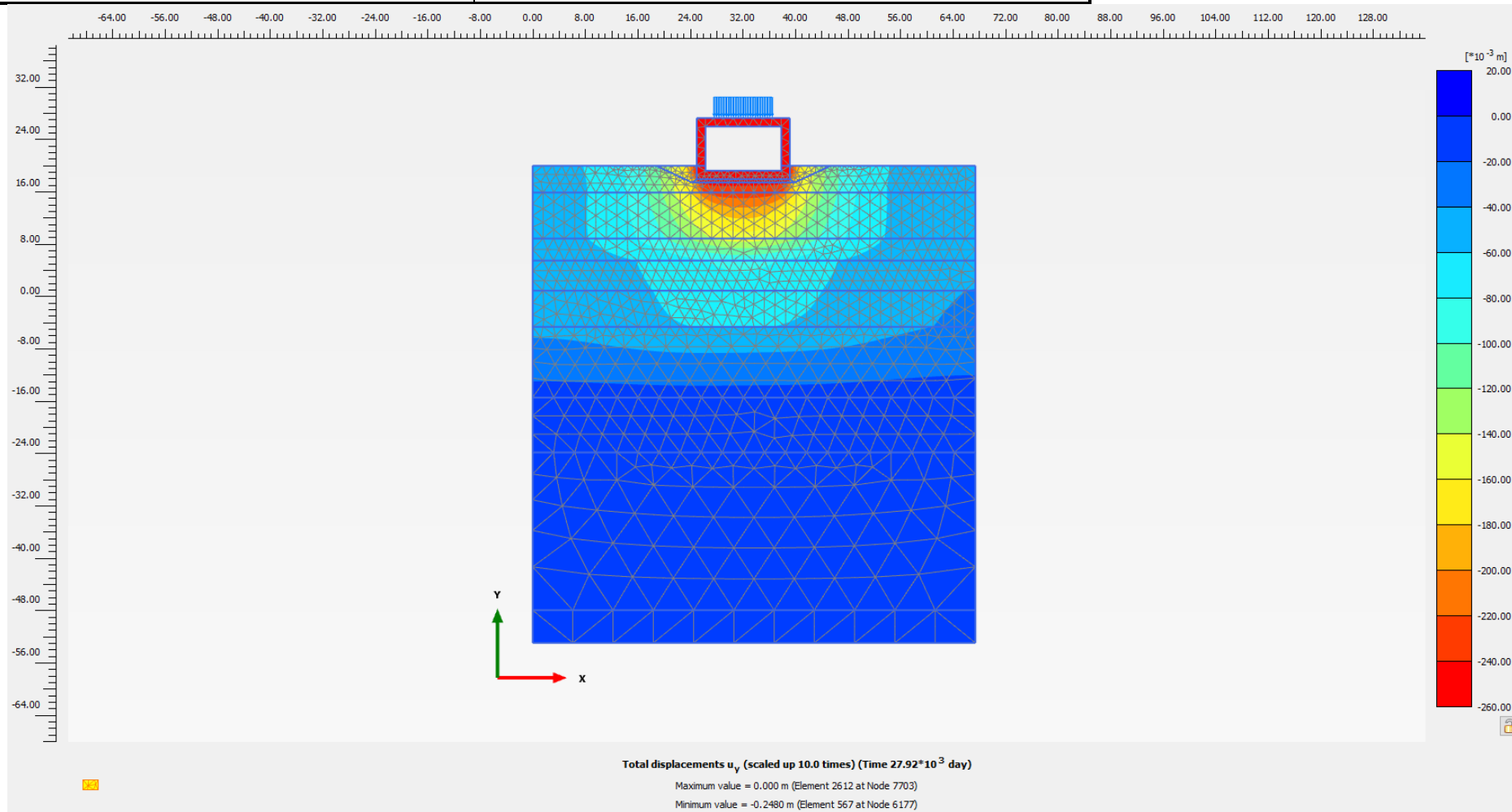


Figura 10.6: Scatolare sez. 2+750 – Spostamenti verticali lungo termine

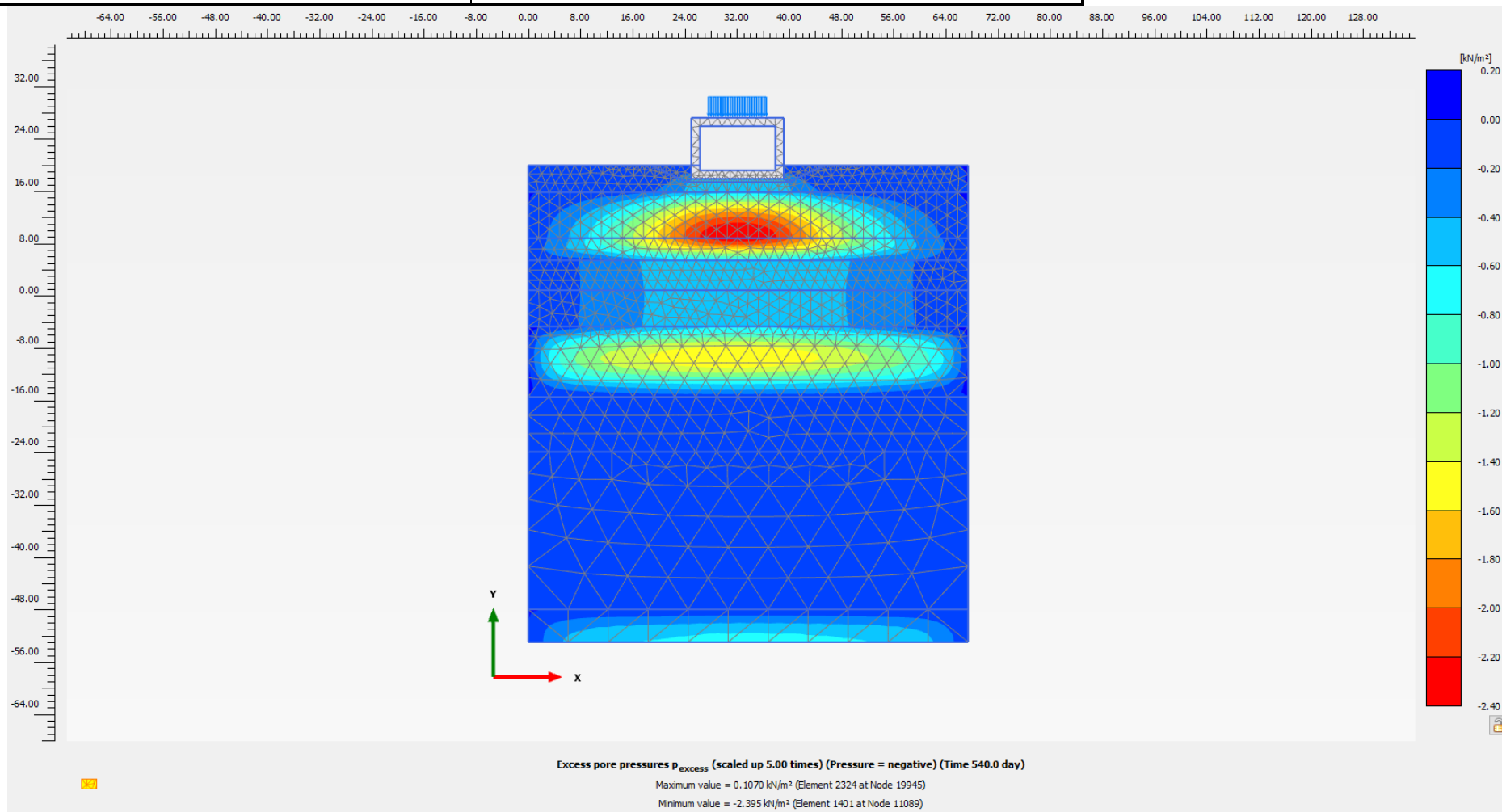


Figura 10.7: Scatolare sez. 2+750 – Sovrappressioni interstiziali Δu termine costruzione

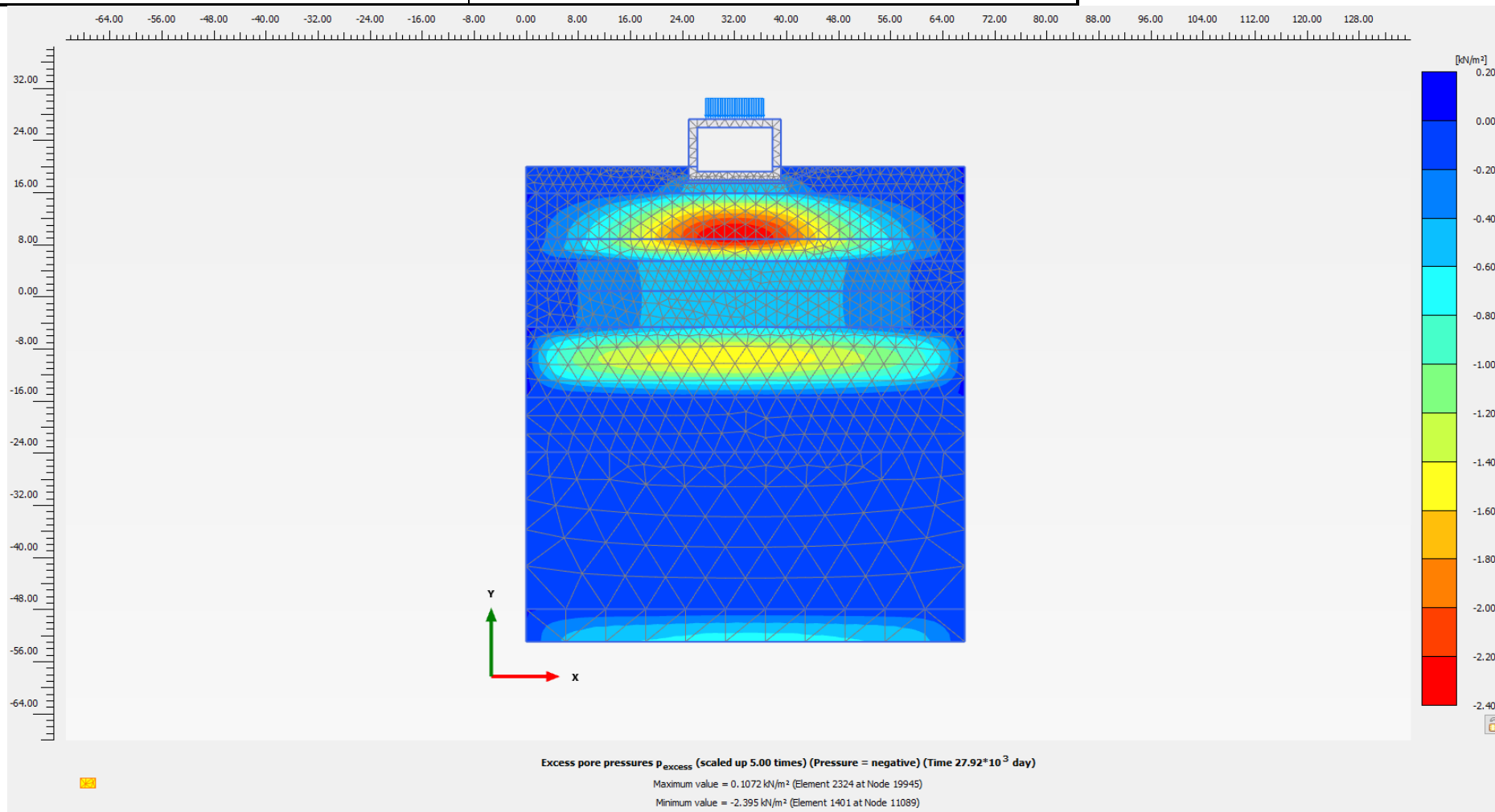


Figura 10.8: Scatolare sez. 2+750 – Sovrappressioni interstiziali Δu lungo termine.

11. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 3+000

11.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

In Figura 11.1 si riporta uno stralcio del Profilo geotecnico (Doc. Rif. [13]) in cui è indicata l'ubicazione della sezione di calcolo lungo il tracciato e la stratigrafia in corrispondenza della stessa. La sezione in esame alla progressiva 3+000 è su scatolare di larghezza 33 m circa. Sulla soletta superiore dello scatolare sono ubicate, in affiancamento, la linea ferroviaria Vigna Clara-Val d'Ala e il Ramo Smistamento. In accordo a quanto riportato nella Relazione Geotecnica generale (Doc. Rif. [10]) e sulla base di quanto descritto nel capitolo 4, nella Tabella 11.1 e Tabella 11.2 sono riportati la stratigrafia ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto, fattorizzati utilizzando i coefficienti M2 riportati nella Tabella 4.4 della presente relazione.

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

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

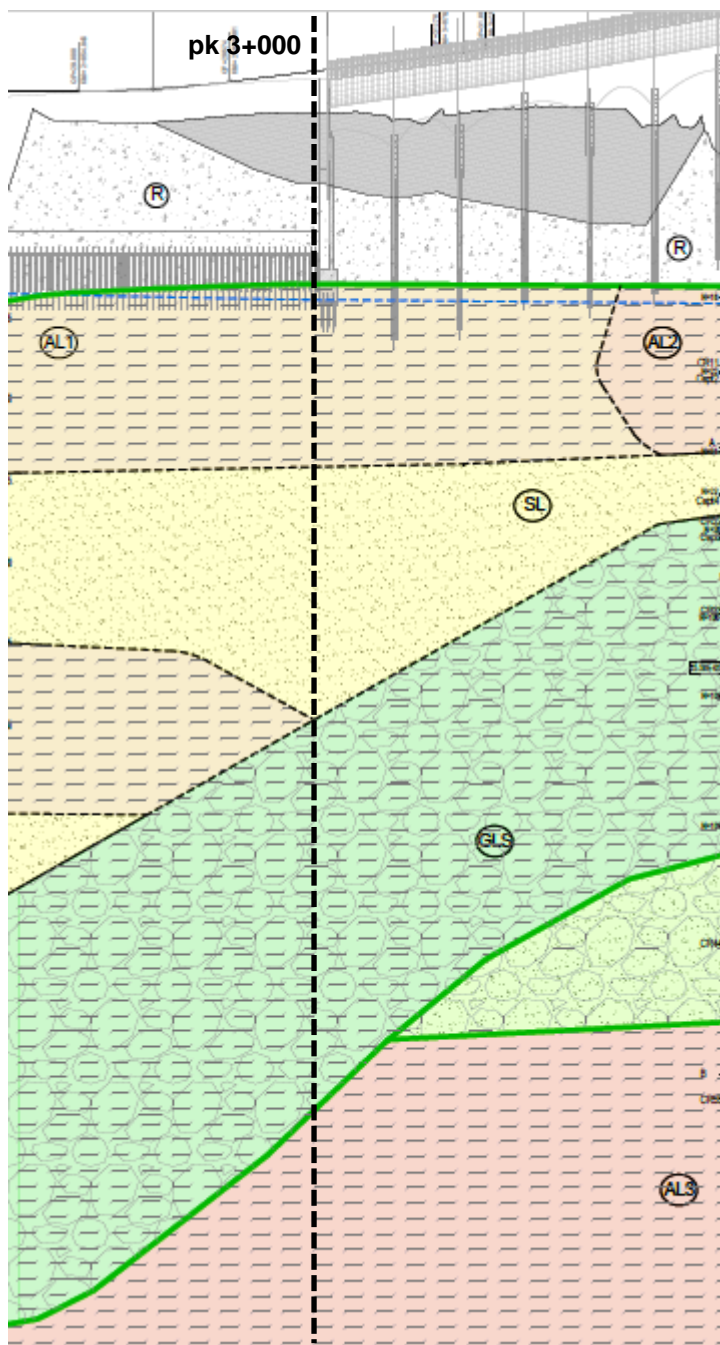


Figura 11.1: Stralcio del Profilo geotecnico in corrispondenza della sezione al km 3+000

Tabella 11.1: Stratigrafia di calcolo per la sezione 3+000

Strato	Profondità da [m da p.c.]	Profondità a [m da p.c.]	Descrizione
R	0	3.8	Materiale rimaneggiato assimilabile a riporto antropico costituito principalmente da sabbia eterometrica limosa e/o limo sabbioso, ma talvolta argilla limosa con locali frammenti di laterizi e inclusi tufacei e sporadiche ghiaie.
AL1	3.8	15	Argilla limosa e limo argilloso debolmente sabbioso/limo sabbioso debolmente argilloso. Presenti livelli millimetrici sabbiosi e rare intercalazioni ghiaiose. Rare tracce di materiale organico.
SL	15	30.5	Sabbia da debolmente limosa a con limo, talvolta ghiaiosa. Rare tracce di materiale organico.
GLS	30.5	54.5	Ghiaia poligenica eterometrica con sabbia debolmente limosa e/o sabbia con ghiaia debolmente argillosa.
AL3	54.5	-	Argilla limosa con livelli da centimetrici a decimetrici di sabbia fine. Presenti tracce di materiale organico.

Tabella 11.2: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 3+000 – Materiali in sito

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Resistenza al taglio non drenata	
	γ_d	ϕ'_k	ϕ'_d	c'_k	c'_d M2	c_u	c_u M2
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
R	18.5	28.5	23.5	0	0	-	-
SL	19	31	25.7	0	0	-	-
GLS	19	33	27.5	0	0	-	-
AL1	19	27	22.2	5	4	50 fino a 25 m da pc; 70 oltre 25 m da pc.	36 fino a 25 m da pc; 50 oltre 25 m da pc
AL3	20	28	23	15	12	300	214

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli ad una quota di circa 3.9 m dal piano campagna.

11.2 CARICHI DI PROGETTO

Per il dettaglio dei carichi di progetto del pacchetto di armamento ferroviario e del carico da traffico assunti per le verifiche SLE si faccia riferimento a quanto riportato nel paragrafo 8.3.2.

11.3 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI
11.3.1 Modelli e fasi di calcolo

Il modello utilizzato per queste analisi è mostrato nella Figura 11.2 e rappresenta lo scatolare alla progressiva 3+000. Lo scatolare ha un'altezza di 10 m e una larghezza di 33 m circa; il pacchetto di armamento ferroviario (ballast, traversine e rotaie) è modellato nelle analisi come sovraccarico distribuito sulla soletta superiore dello scatolare.

Per il calcolo dei cedimenti si sono impiegati i seguenti modelli costitutivi per i terreni, implementati all'interno del codice di calcolo Plaxis 2D:

- modello elasto-plastico con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb per l'unità geotecnica AL3;
- modello elasto-plastico con incrudimento "Modified Cam-Clay" per l'unità geotecnica AL1;
- modello elasto-plastico con incrudimento "Hardening Soil" per le unità geotecniche R, SL e GLS.

La stratigrafia di calcolo utilizzata è riportata in Tabella 11.1. In Tabella 11.3, Tabella 11.4 e Tabella 11.5 si riportano i valori dei parametri di input per i modelli costitutivi sopracitati.

Tabella 11.3: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 3+000 – Materiali in sito – Modello Mohr-Coulomb

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Resistenza al taglio non drenata		Modulo di Young operativo	Rapporto di Sovraconsolidazione	Permeabilità
	γ_d	ϕ'_k	ϕ'_d M2	c'_k	c'_d M2	c_u	c_u M2	$E_{op.}$	OCR	k
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[-]	[m/s]
AL3	20	28	23	15	12	300	214	60	-	1.0E-09

Tabella 11.4: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 3+000 – Materiali in sito – Modello Cam-Clay modificato

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Resistenza al taglio non drenata		Rapporto di Sovraconsolidazione	Indice dei vuoti iniziale	Rapporto di Compressione e Ricomprensione		Coefficiente di consolidazione secondaria	Permeabilità
	γ_d	ϕ'_k	ϕ'_d M2	c'_k	c'_d M2	c_u	c_u M2	OCR	e_0	C_c	C_r	$C_{\alpha s}$	k
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m/s]
AL1	19	27	22.2	5	4	50 fino a 25 m da pc; 70 oltre 25 m da pc.	36 fino a 25 m da pc; 50 oltre 25 m da pc.	2.0 fino a 12 m da pc; 1 oltre 12 m da pc	0.85	0.27	0.05	0.003	1.0E-08

Tabella 11.5: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 3+000 – Materiali in sito – Modello Hardening Soil

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Moduli di Young modello Hardening Soil			m	Permeabilità
	γ_d	ϕ'_k	ϕ'_d	c'_k	c'_d	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}		k
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[m/s]
R	18.5	28.5	23.5	0	0	11.4	11.4	34.3	0.01	1.0E-07
SL	19	31	25.7	0	0	20 da 14.1 m da pc a 19.1 m da pc; 29.9 da 19.1 m da pc a 29.6 m da pc	20 da 14.1 m da pc a 19.1 m da pc; 29.9 da 19.1 m da pc a 29.6 m da pc	60 da 14.1 m da pc a 19.1 m da pc; 89.7 da 19.1 m da pc a 29.6 m da pc	0.01	1.0E-06
GLS	19	33	27.5	0	0	79.5	79.5	238.5	0.01	1.0E-05

Il modello implementato in Plaxis è bi-dimensionale (analisi *plane strain*) e include lo scatolare in sezione, con la propria geometria ed i sovraccarichi. Per definire l'andamento dei cedimenti nel tempo viene omesso nell'analisi il sovraccarico da traffico ferroviario in accordo a quanto specificato in Doc. Rif. [3].

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- generazione dello stato tensionale iniziale geostatico;
- scavo e costruzione dello scatolare per una durata di 6 mesi;
- costruzione dell'armamento ferroviario sullo scatolare per una durata di 30 giorni e successiva consolidazione di 11 mesi fino alla messa in opera dello scatolare;
- consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio della linea ferroviaria per una durata di 6 mesi, 1 anno, 3 anni, 10 anni, 20 anni e 75 anni.

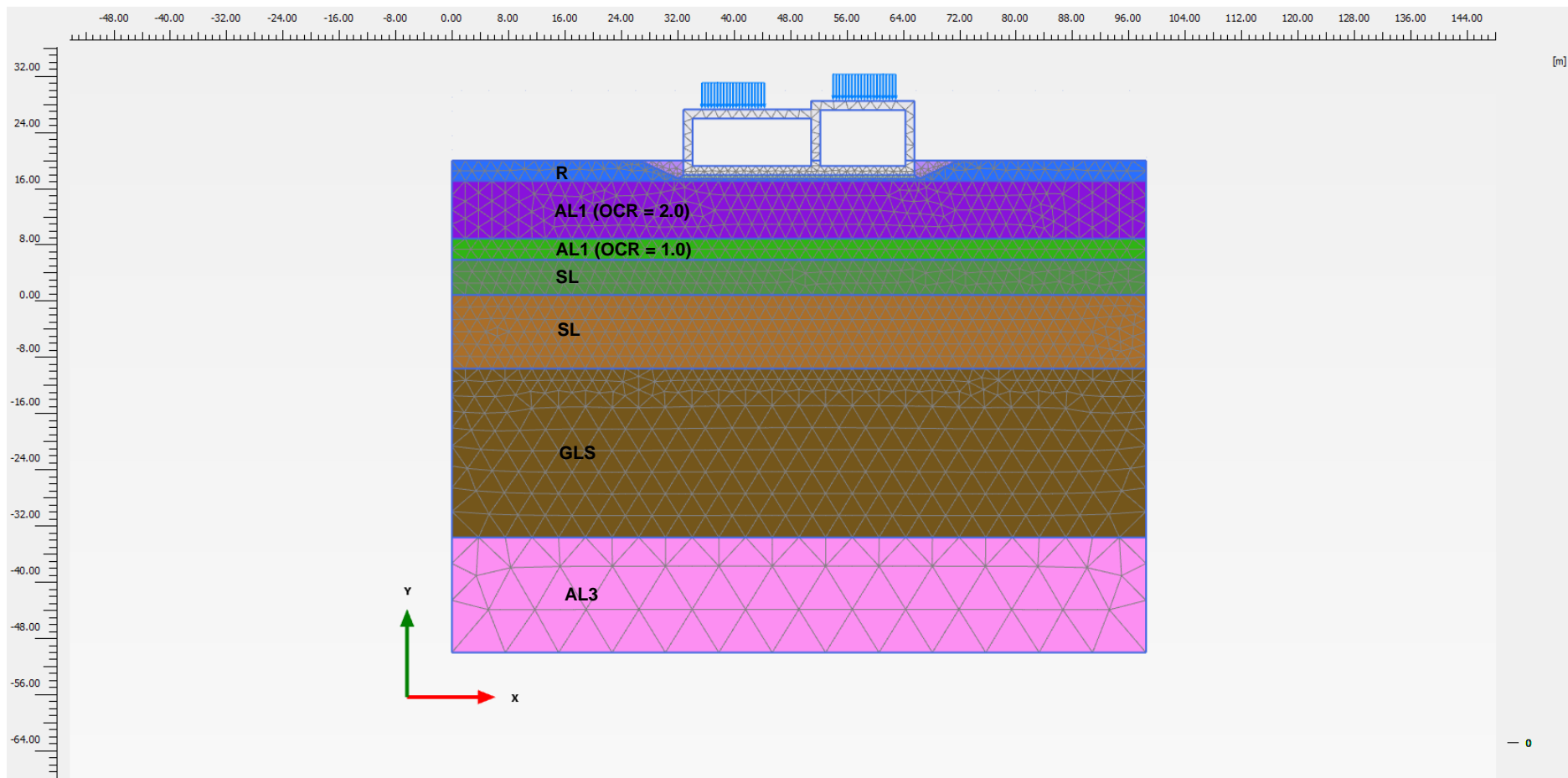



Figura 11.2: Modello Scatolare, sez. 3+000

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA					
	GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD					
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 46 di 54

11.3.2 Risultati

Con riferimento al Manuale di Progettazione RFI DINIC MA CS 00 001 C (parte IV), è necessario garantire che il cedimento residuo (differenza tra cedimento di lungo termine e cedimento a fine costruzione rilevato) sia inferiore a 5 cm.

In Figura 11.3 è riportato lo spostamento verticale u_y lungo una sezione verticale in corrispondenza dell'asse dello scatolare al termine delle seguenti fasi di calcolo:


- a breve termine;
- dopo 6 mesi dall'inizio della costruzione;
- dopo la posa dell'armamento ferroviario;
- a termine di tutte le fasi di costruzione dello scatolare e messa in opera (ovvero trascorso un anno dalla posa dell'armamento ferroviario);
- dopo 6 mesi dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 1 anno dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 3 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 10 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 20 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria;
- dopo 75 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria.

In Figura 11.4 è riportato lo spostamento verticale u_y lungo una sezione orizzontale in corrispondenza della base dello scatolare al termine delle stesse fasi di calcolo.

Come mostrato nelle Figure Figura 11.3 e Figura 11.4, dopo 6 mesi dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria il cedimento coincide con il cedimento a lungo termine (75 anni), pertanto dopo 6 mesi dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria si verifica la totale dissipazione delle sovrappressioni interstiziali indotte dal carico (si vedano Figura 11.7 e Figura 11.8).

Il cedimento dovuto alla consolidazione secondaria è stato stimato tramite la metodologia descritta al cap. 7, per un intervallo temporale a partire da 1 anno fino a 20 anni dalla messa in esercizio della linea ferroviaria. Risulta, per la sezione in esame:

$$s_s = \sum_{i=1}^n \log\left(\frac{t}{t_{100,i}}\right) c_{\alpha\varepsilon,i} h_i = 4.5 \text{ cm}$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA					
	GRONDA MERCI DI ROMA – CHIUSURA ANELLO NORD					
TRATTA: TOR DI QUINTO – VAL D'ALA						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 21R11	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 47 di 54

Dove :

- s_s = cedimento secondario;
- t = tempo generico finale a partire dall'applicazione del carico a cui si intende valutare il cedimento secondario; nel caso in esame $t = 20$ anni;
- $t_{100,i}$ = tempo di inizio cedimento secondario, ovvero un anno a partire dalla messa in esercizio della linea ferroviaria;
- h_i = spessore dello strato interessato dal cedimento secondario, nel caso specifico $h_1 = 11.2$ m (strato AL1 superiore, in cui gli incrementi tensionali sono maggiori del 10% della tensione geostatica);
- n = numero di strati di terreno interessati dal cedimento secondario; nel caso in esame $n = 1$;
- $c_{\alpha\epsilon,i}$ = indice di consolidazione secondaria; nel caso in esame $c_{\alpha\epsilon} = 0.003$ per lo strato AL1.

Al termine della costruzione, quindi, il cedimento è pari a circa 23.5 cm, che coincide con il cedimento dopo 75 anni; i cedimenti residui da consolidazione primaria sono pertanto nulli. Ne consegue che i cedimenti residui sono dovuti alla sola consolidazione secondaria e pari a circa 4.5 cm e quindi inferiori al valore limite di 5 cm.

In Figura 11.5, Figura 11.6, Figura 11.7 e Figura 11.8 sono riportati i *contours* dei cedimenti totali a fine costruzione e a lungo termine e le sovrappressioni in eccesso per le stesse fasi di calcolo.

Alla luce di tali risultati, con i tempi di realizzazione sopra previsti, si ritiene che i cedimenti calcolati rispettino i criteri di ammissibilità sopra riportati. Data l'entità dei cedimenti e la velocità di dissipazione degli stessi, se tali valori fossero confermati nella successiva fase progettuale, si potrebbe valutare l'applicazione di un rilevato di precarica per un'altezza ed un tempo sufficienti per poter scontare la maggior parte dei cedimenti prima della messa in opera della struttura.

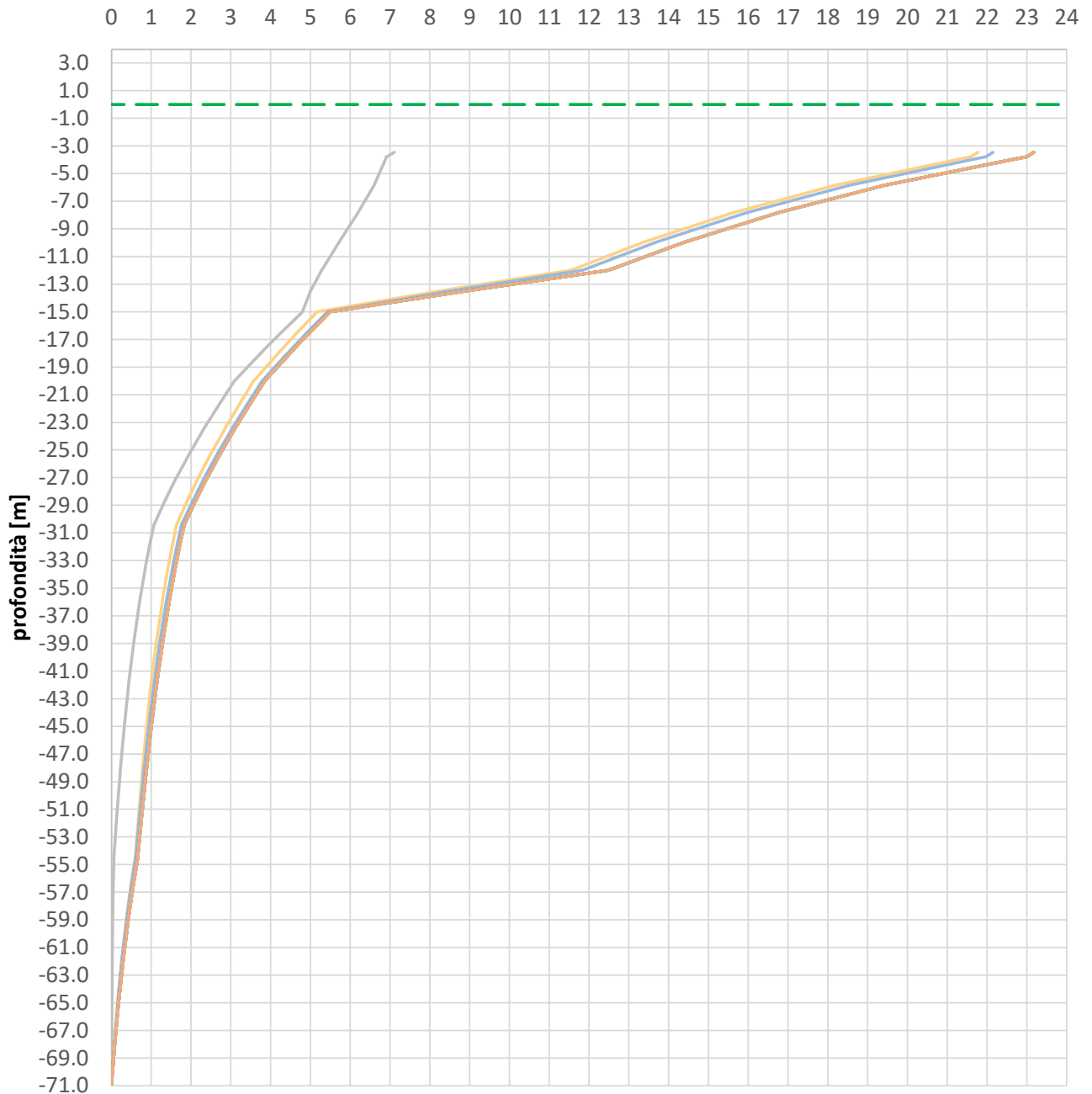
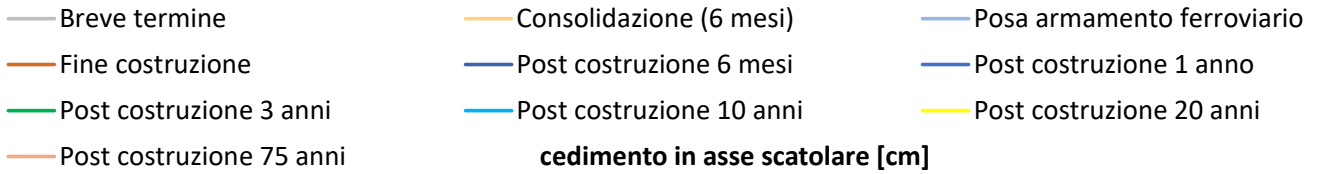


Figura 11.3: Scatolare sez. 3+000 – Spostamenti verticali in corrispondenza del centro della soletta di base dello scatolare

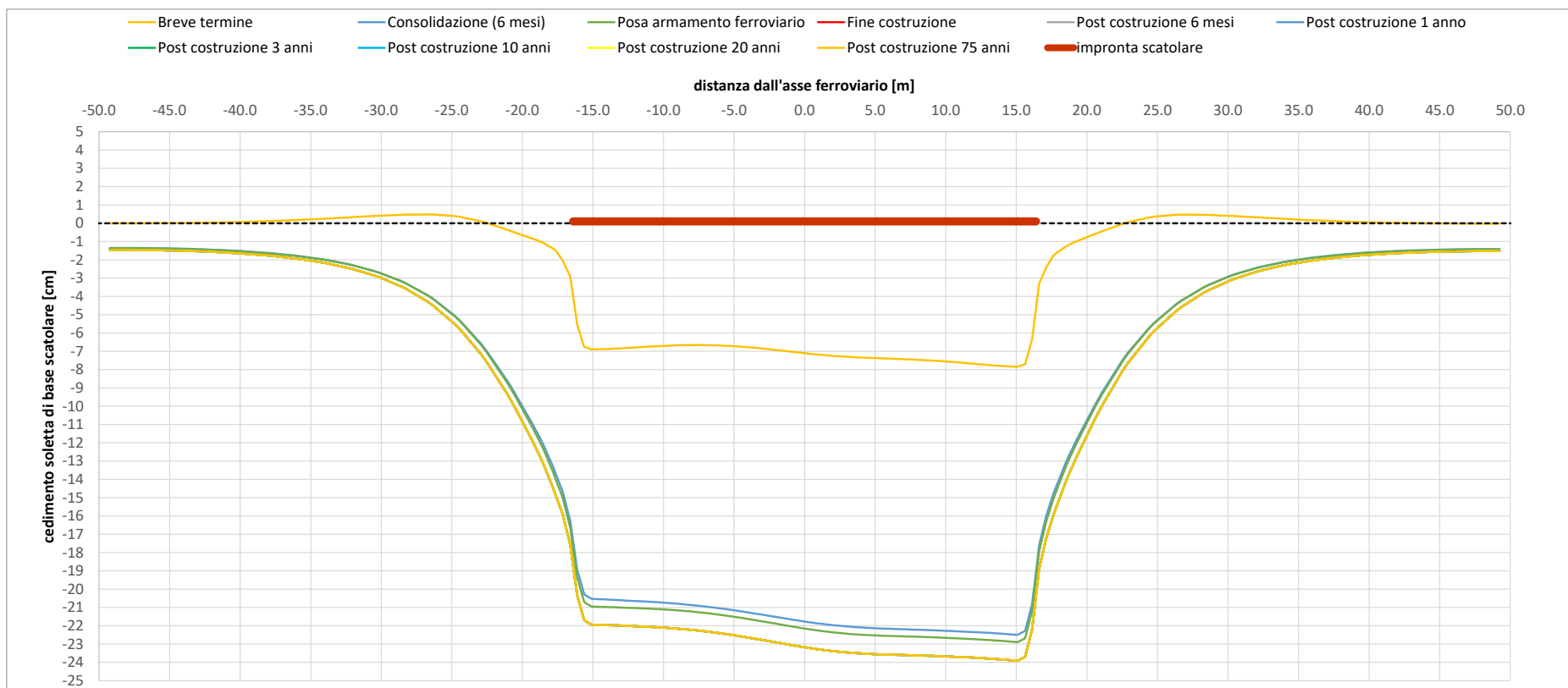


Figura 11.4: Scatolare sez. 3+000 – Spostamenti verticali in corrispondenza della soletta di base dello scatolare

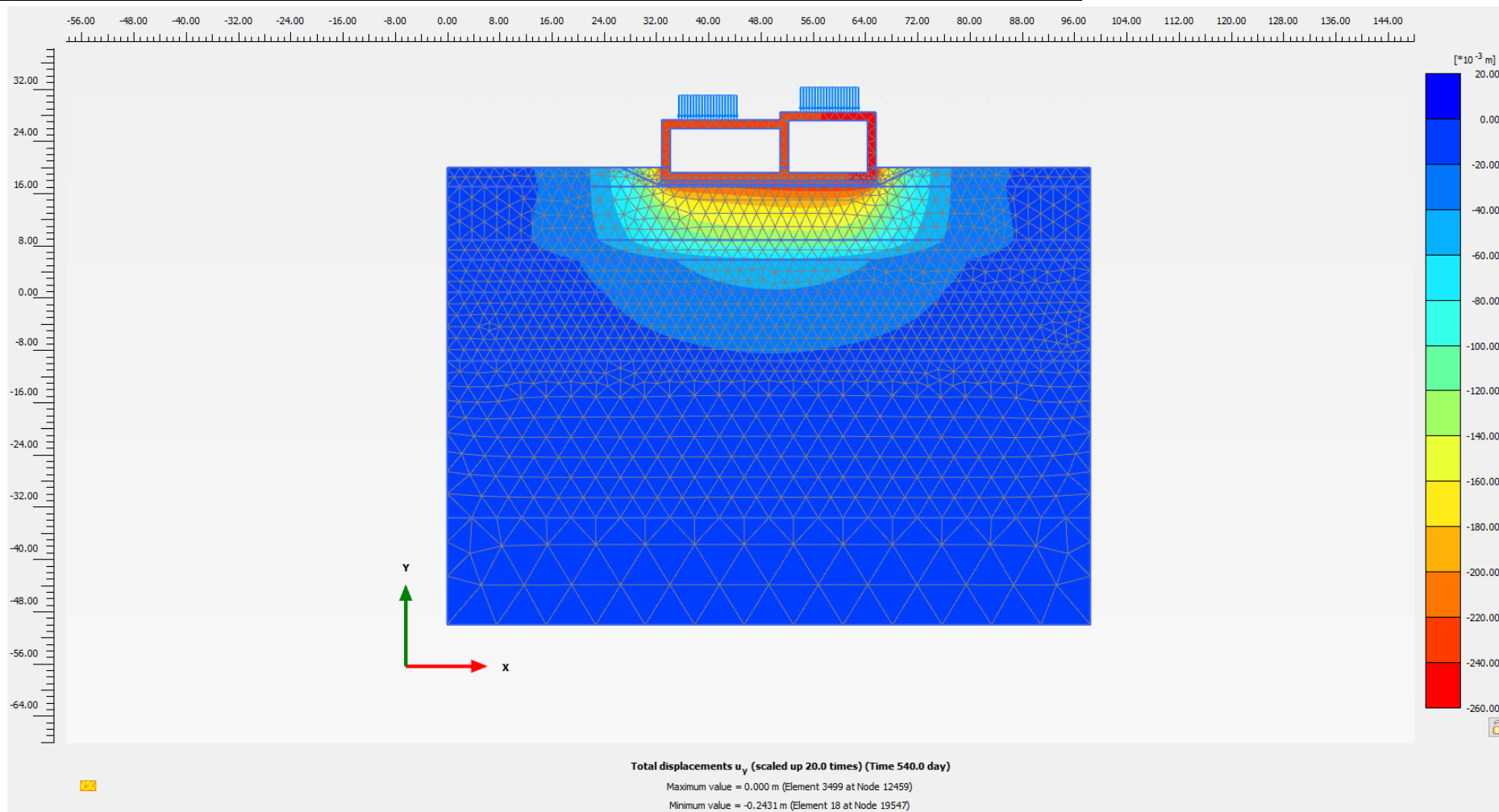


Figura 11.5: Scatolare sez. 3+000 – Spostamenti verticali termine costruzione



PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^a FASE

NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD

TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO

RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI
E SCATOLARI

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NR4E	21R11	RH	GE0006001	A	51 di 54

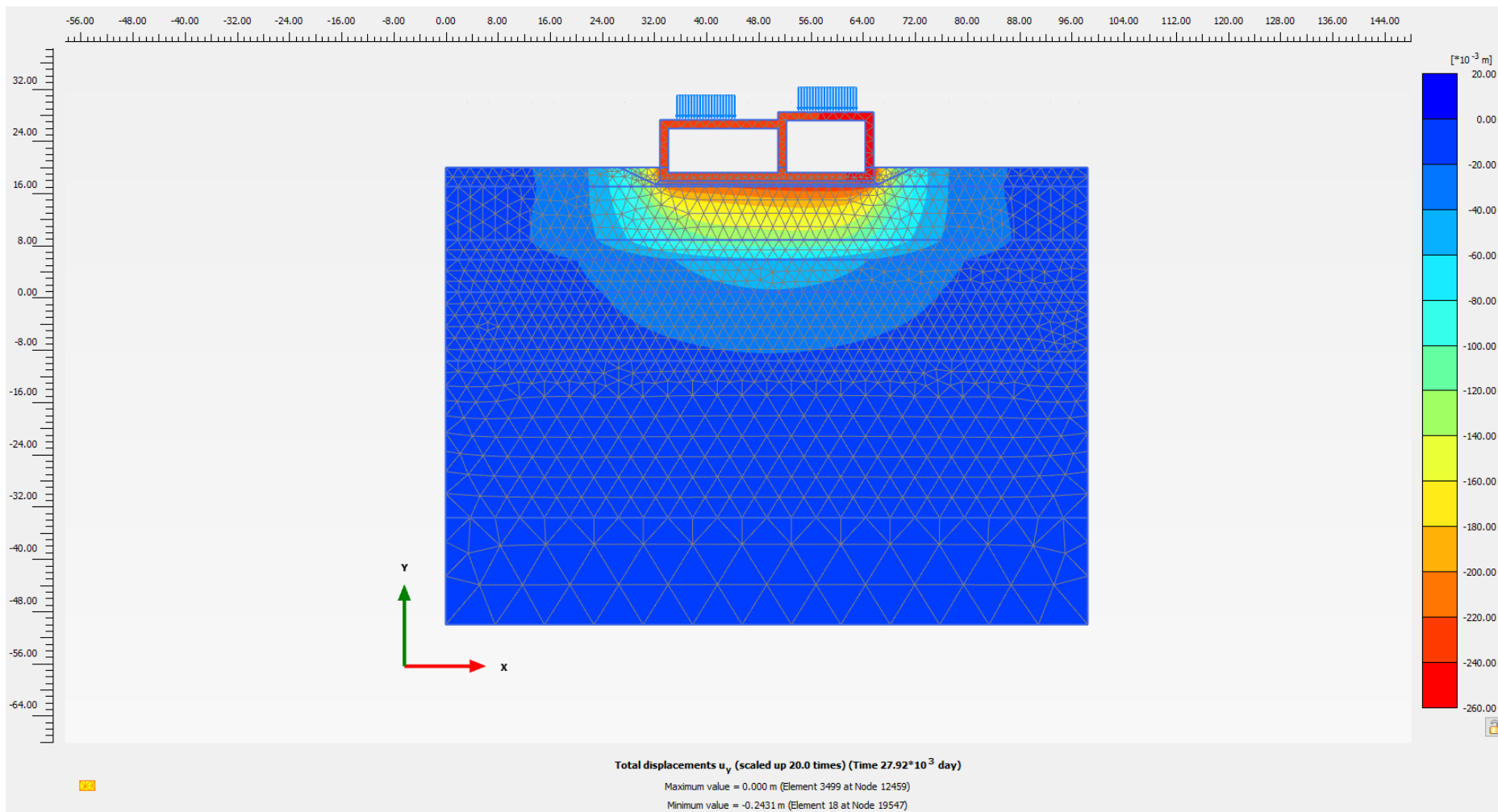


Figura 11.6: Scatolare sez. 3+000 – Spostamenti verticali lungo termine

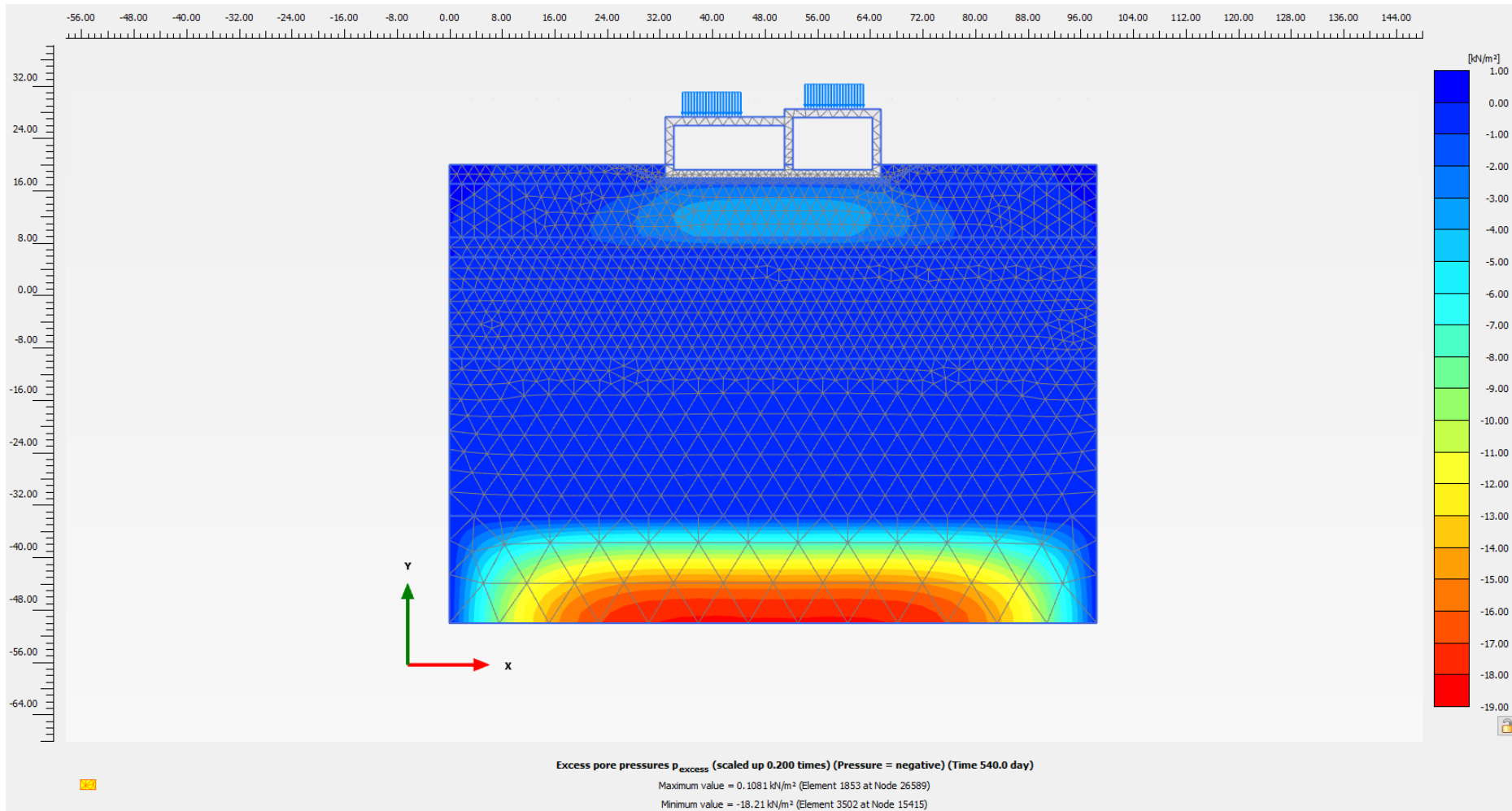


Figura 11.7: Scatolare sez. 3+000 – Sovrappressioni interstiziali Δu termine costruzione

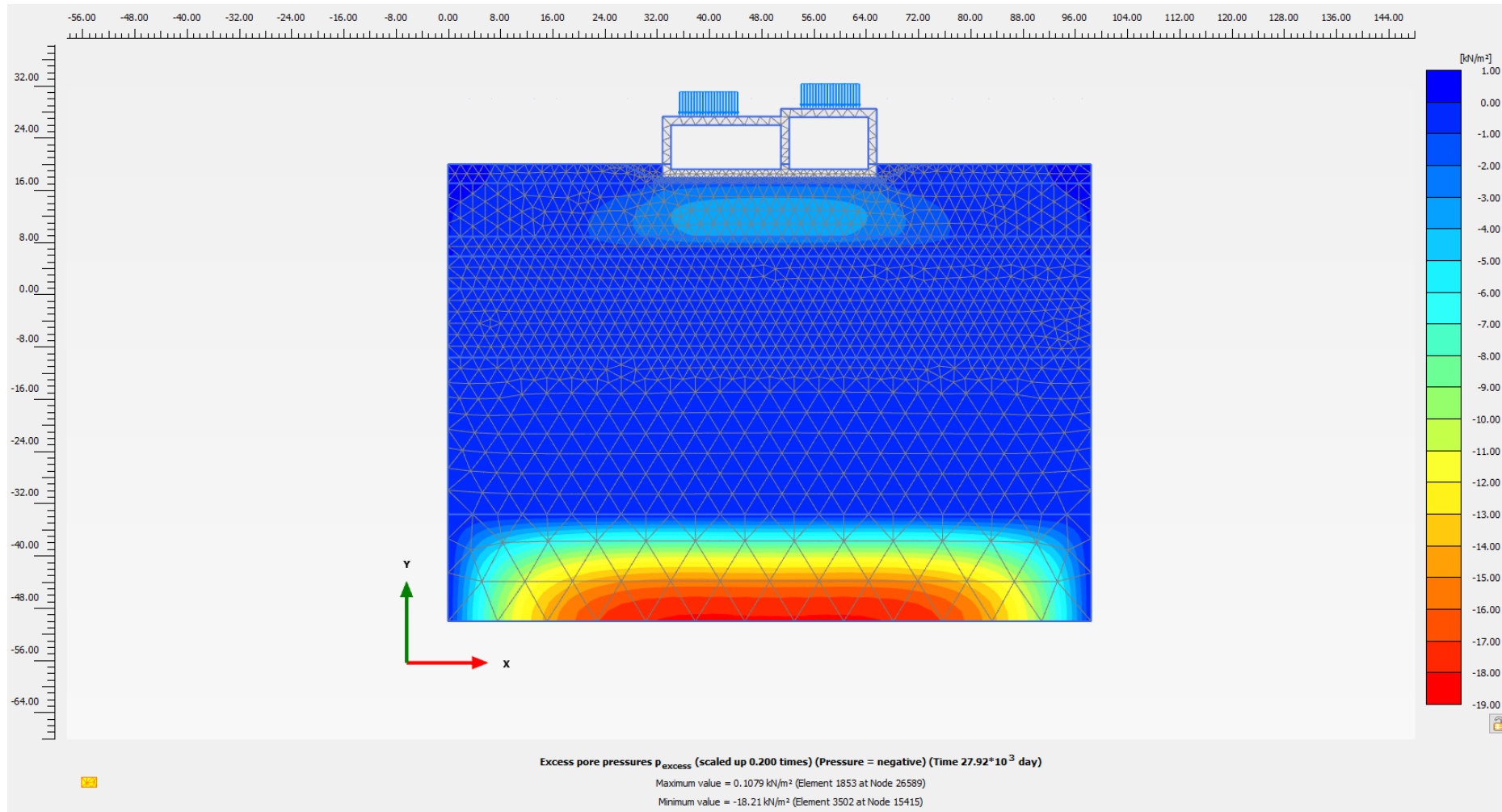


Figura 11.8: Scatolare sez. 3+000 – Sovrappressioni interstiziali Δu lungo termine



PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^a FASE

NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD

TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO

**RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI
E SCATOLARI**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NR4E	21R11	RH	GE0006001	A	54 di 54