

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP J31H03000180008

DIREZIONE TECNICA
S.O. Ponti e grandi strutture

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA DI 2^ FASE

NPP 0258: GRONDA MERCI DI ROMA - CHIUSURA ANELLO NORD
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO

GEOTECNICA
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI

SCALA:

-

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
NR4E	12	R	09	RH	GE0006	001	A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione per CSLPP	S.G.I.	Luglio 2023	L. Utzeri	Luglio 2023	T. Paoletti	Luglio 2023	A. Vittozzi Luglio 2023
								ITALFERR S.p.A. U.O. Opere Civili e Gestione delle varianti Dot. Ing. Angelo Vittozzi Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma N° A20783

File: NR4E12R09RHGE0006001A

n. Elab.:

INDICE

1. PREMESSA	5
2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	6
2.1 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO	6
2.2 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO E DI BASE	6
2.3 SOFTWARE	7
3. DESCRIZIONE DEL TRACCIATO	8
4. CRITERI DI VERIFICA IN ACCORDO ALLE NTC2018	9
4.1 GENERALE	9
4.2 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI.....	10
4.2.1 <i>Verifiche Stati Limite Ultimi (SLU)</i>	10
4.2.2 <i>Verifiche Stati limite di esercizio (SLE)</i>	12
4.3 STABILITÀ DEL SITO NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE	13
4.4 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI	14
4.4.1 <i>Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche</i>	14
4.4.2 <i>Verifiche Stati limite ultimi (SLU)</i>	15
4.4.3 <i>Stati limite di esercizio (SLE)</i>	16
5. COEFFICIENTI SISMICI PER LE VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE	17
6. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA	18
6.1 CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI.....	18
6.1.1 <i>Slope/W</i>	18
6.1.2 <i>Plaxis 2D</i>	18
6.2 METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE	18
6.2.1 <i>Verifiche di stabilità</i>	18
6.2.2 <i>Valutazione degli spostamenti</i>	19
7. CALCOLO DEI CEDIMENTI SECONDARI	19


8. CARATTERISTICHE DEL CORPO FERROVIARIO	22
8.1 GEOMETRIA DEI RILEVATI FERROVIARI	22
8.2 MATERIALI E PARAMETRI GEOTECNICI	22
8.3 CARICHI DI PROGETTO	23
8.3.1 Carichi ferroviari per le Verifiche SLU.....	24
8.3.2 Carichi ferroviari per le Verifiche SLE.....	25
9. SELEZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO.....	26
10. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 0+650	27
10.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO	27
10.2 CARICHI DI PROGETTO	30
10.3 VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE	30
10.3.1 Risultati	31
10.4 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI	35
10.4.1 Modelli e fasi di calcolo	35
10.4.2 Risultati	39
11. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 1+550	51
11.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO	51
11.2 CARICHI DI PROGETTO	54
11.3 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI	56
11.3.1 Introduzione	56
11.3.2 Modelli costitutivi e proprietà strutturali.....	57
11.3.3 Fasi di calcolo	58
11.3.4 Fondazione diretta su terreno naturale (Analisi A)	59
11.3.5 Colonne deep mixing – Metodologia di installazione.....	68
11.3.6 Intervento di miglioramento con colonne deep mixing (Analisi B).....	69
11.3.7 Inclusioni rigide – Metodologia di installazione.....	81
11.3.8 Intervento di miglioramento con inclusioni rigide – Pali intestati nell'unità geotecnica AL1 (Analisi C) ..	81

11.3.9 *Intervento di miglioramento con inclusioni rigide – Pali intestati nell'unità geotecnica SL (Analisi D) ...87*

11.3.10 *Cedimento secondario96*

11.3.11 *Conclusioni96*

11.3.12 *Intervento di miglioramento con inclusioni rigide – Intensità del trattamento 103*


	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 5 di 106

1. PREMESSA

Con riferimento a quanto indicato nella Relazione Geotecnica Generale (NR4E12R09GEGE0006001A) e dettagliato nella Relazione Generale, 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.

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.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 6 di 106

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 – Carta Geologica con elementi di geomorfologia e profilo geologico (Doc. NR4E12R69L5GE0001001A)
- [11] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord – Relazione Geotecnica generale (Doc. Rif. NR4E12R09GEGE0006001A)


- [12] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord – Profilo geotecnico (Doc. Rif. NR4E12R09F6GE0006001A)
- [13] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord – Relazione suscettibilità alla liquefazione (Doc. Rif. NR4E12R09GEGE0006002A)
- [14] ITALFERR – Progetto di Fattibilità tecnico Economica – Gronda merci di Roma – Chiusura anello Nord – Relazione di predimensionamento fondazioni e opere provvisionali Viadotti (Doc. Rif. NR4E12R09CLVI0102001B)

2.3 SOFTWARE

- [15] Slope\W – GeoStudio 2017 (Versione 7.23) – Geo-Slope International ([http:// www.geo-slope.com](http://www.geo-slope.com))
- [16] PLAXIS B.V.. “Plaxis – Finite Element Code for Soil and Rock Analyses”. Plaxis 2D – V21. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherland. ([http:// w.plaxis.nl](http://w.plaxis.nl))
- [17] PLAXIS B.V.. “Plaxis – Finite Element Code for Soil and Rock Analyses”. Plaxis 3D – V21. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherland. ([http:// w.plaxis.nl](http://w.plaxis.nl))

3. DESCRIZIONE DEL TRACCIATO

- Da inizio tratta al km 0+225 ca la linea in progetto è prevista circa a raso;
- Dal km 0+225 ca. al km 0+670 ca.: a partire dalla stazione Vigna Clara la linea di progetto si sviluppa in rilevato con altezze massime pari a 7 m ca. Il rilevato si imposta a Nord della sede ferroviaria esistente in uscita dalla stazione Vigna Clara; tale ramo ferroviario non entrerà in esercizio. Il rilevato sarà delimitato a Nord da un muro di sostegno di altezza 8.2m, mentre a Sud si prevede di realizzare una scarpata di altezza massima pari a circa 3.0 m e pendenza 3H:2V. La linea prosegue poi in viadotto fino alla stazione Tor di Quinto.
- Dal km 1+470 ca. al km 2+130 ca. si sviluppa la nuova Stazione Tor di Quinto. L'adeguamento della stazione prevede la realizzazione di due scatolari e una galleria artificiale.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 9 di 106

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 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 10 di 106

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]).


 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO					
	RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A

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 carico	gr_2	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽¹⁾	-
	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 neve	in fase di esecuzione SLU e SLE	0,80 0,0	0,0 0,0	0,0 0,0
Azioni termiche	T_k	0,60	0,60	0,50

⁽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 2^ FASE NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO					
	RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	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.

	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 13 di 106

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 $q_{c1N} > 180$ 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. [13] 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. [13]); 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 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 14 di 106

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 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. [2]).


 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2ª FASE NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO					
	RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A

Tabella 4.6: Verifiche di sicurezza in funzione della Classe d'uso (Tab. C7.3.1, 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 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 16 di 106

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 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 17 di 106

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]), pari a $a_{\max} = 0.180g$
- 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+650	0.180	0.068	± 0.034
(*) valore in corrispondenza del punto P6 definito nel Doc. Rif. [13]			

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 18 di 106

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 V21.

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 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 19 di 106

Il coefficiente di sicurezza a rottura lungo la superficie di scorrimento viene definito come rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie e quella effettivamente mobilitata:

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

Il codice 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

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 tutte 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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2ª FASE NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO					
	RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A

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.

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	ϕ'_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
MATERIALE DI RINTERRO	0.5	20	35	29.3	0	0	40	1x10 ⁻⁵

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 23 di 106

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 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°.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 24 di 106

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 omesso nell'analisi il sovraccarico da traffico ferroviario in accordo a quanto specificato in Doc. Rif. [3].

	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 26 di 106


9. SELEZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO

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

- **Sezione al km 0+650** in rilevato delimitato sul lato nord da un muro di sostegno. Il nuovo rilevato è costruito in adiacenza a un ramo della linea ferroviaria esistente che non entrerà in esercizio. Il nuovo rilevato ha un'altezza variabile tra 3.5m e 6.0m circa;
- **Sezione al km 1+550** in corrispondenza della Stazione Tor di Quinto. L'adeguamento della stazione esistente prevede la realizzazione di uno scatolare articolato in diversi corpi di fabbrica. Per la scelta della tipologia di fondazione si è analizzata la sezione più gravosa in termini di geometria e carichi applicati, in corrispondenza del concio centrale dello scatolare. I cedimenti valutati dall'analisi indicano una fondazione su pali quale soluzione progettuale ottimale.

Per la prima sezione sono state svolte le verifiche di pre-dimensionamento relative alla stabilità globale e ai cedimenti, mentre per la seconda sezione 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]).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 27 di 106

10. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 0+650

10.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

In Figura 10.1 si riporta uno stralcio del Profilo geotecnico (Doc. Rif. [12]) in cui è indicata l'ubicazione della sezione di calcolo lungo il tracciato e la stratigrafia in corrispondenza della stessa. Le analisi condotte per la sezione alla progressiva pk 0+650 sono state eseguite considerando la stratigrafia relativa alla sezione pk 0+500 in quanto ritenuta più onerosa per la stima dei cedimenti, essendo caratterizzata da spessori dell'unità geotecnica AL1 maggiori. 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 nella 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. Come dettagliato nel Doc. Rif. [10] l'unità geotecnica AL3, presente a partire da 55m di profondità in corrispondenza della sezione in esame, non è stata investigata nella campagna d'indagine relativa al Lotto 1b e pertanto non è stata caratterizzata in questa fase progettuale. A tal proposito si può ritenere che tale unità, in virtù della notevole profondità a cui si rinviene lungo il tracciato, non abbia impatti significativi sul comportamento delle opere in esame e pertanto essa non è stata inclusa nei modelli di calcolo descritti nel seguito.

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 il materiale di rinterro.

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.

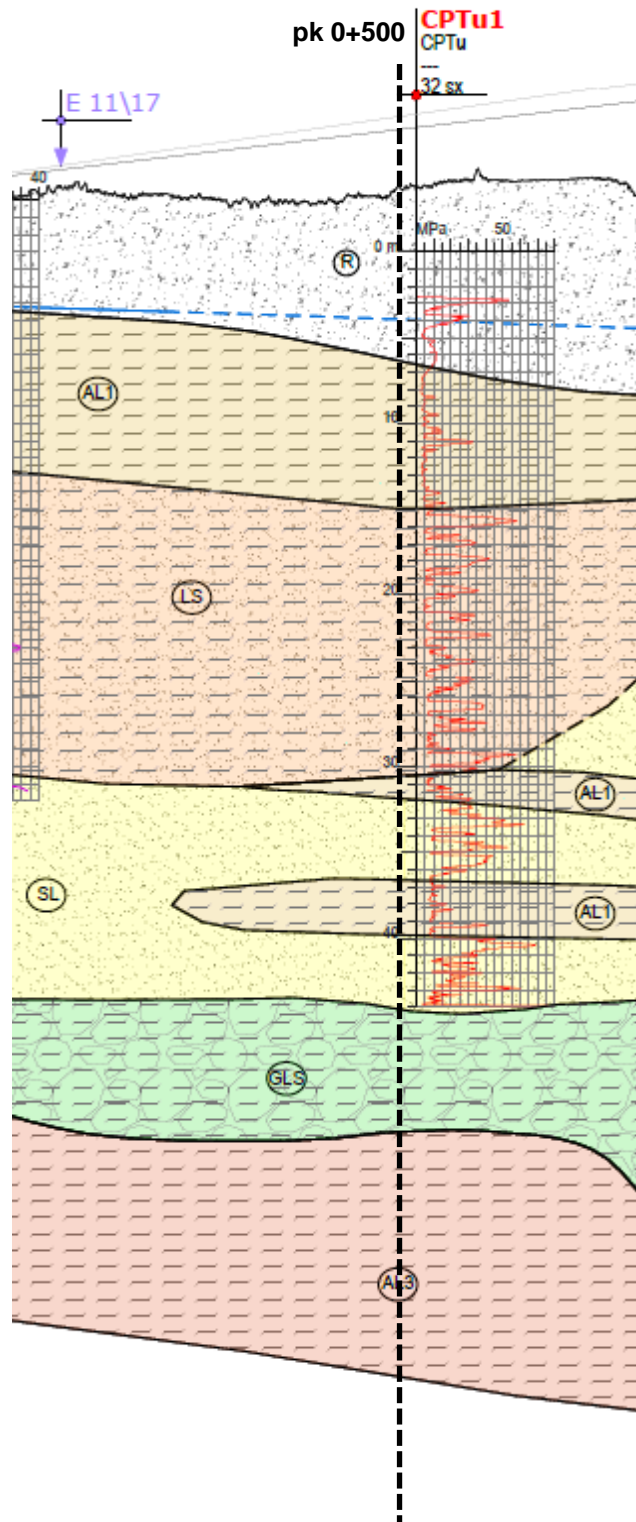


Figura 10.1: Stralcio del Profilo geotecnico in corrispondenza della sezione al km 0+500


Tabella 10.1: Stratigrafia di calcolo per la sezione al km 0+650

Strato	Profondità da [m da p.c.]	Profondità a [m da p.c.]	Descrizione
R	0	10	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	10	19	Argilla limosa e limo argilloso debolmente sabbioso/limo sabbioso debolmente argilloso. Presenti livelli millimetrici sabbiosi e rare intercalazioni ghiaiose. Rare tracce di materiale organico.
LS	19	34	Limo argilloso debolmente sabbioso e/o limo sabbioso debolmente argilloso con frequenti livelletti di sabbia limosa e rara ghiaia. Rare tracce di materiale organico.
AL1	34	36	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	40	Sabbia da debolmente limosa a con limo, talvolta ghiaiosa. Rare tracce di materiale organico.
AL1	40	43	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	43	47	Sabbia da debolmente limosa a con limo, talvolta ghiaiosa. Rare tracce di materiale organico.
GLS	47	55	Ghiaia poligenica eterometrica con sabbia debolmente limosa e/o sabbia con ghiaia debolmente argillosa.
AL3	55	-	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 al km 0+650 – 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 M2	c'_k	c'_d M2	c_u	c_u M2
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
LS	19	28	23	0	0	75	54
AL1	19	22	17.9	10	8	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
R	18.5	28.5	23.5	0	0	-	-
SL	19	31	25.7	0	0	-	-
GLS	19	33	27.5	0	0	-	-

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli ad una profondità di circa 8.0 m dal piano campagna.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 30 di 106

10.2 CARICHI DI PROGETTO

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

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

$$K_H = + 0.068 \quad (\text{concorde alla direzione di scivolamento})$$

$$K_V = \pm 0.034 \quad (\text{verificando la più cautelativa tra negativo e positivo})$$

La condizione più cautelativa risulta essere rappresentata da $K_V = -0.034$.

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

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

essendo:

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

R_d = R/γ_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. Le superfici di rottura critiche sono quelle che interferiscono con l'armamento ferroviario; nel paragrafo seguente si riporta, tra queste superfici, quella con fattore di sicurezza minimo.

10.3.1 Risultati

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

Tabella 10.3: Risultati verifiche di stabilità globale per la sezione al km 0+650

ANALISI	R/E _d	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA (parametri drenati)	1.253	Figura 10.2
STATICA (parametri non drenati)	1.253	Figura 10.3
PSEUDOSTATICA	1.327	Figura 10.4

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

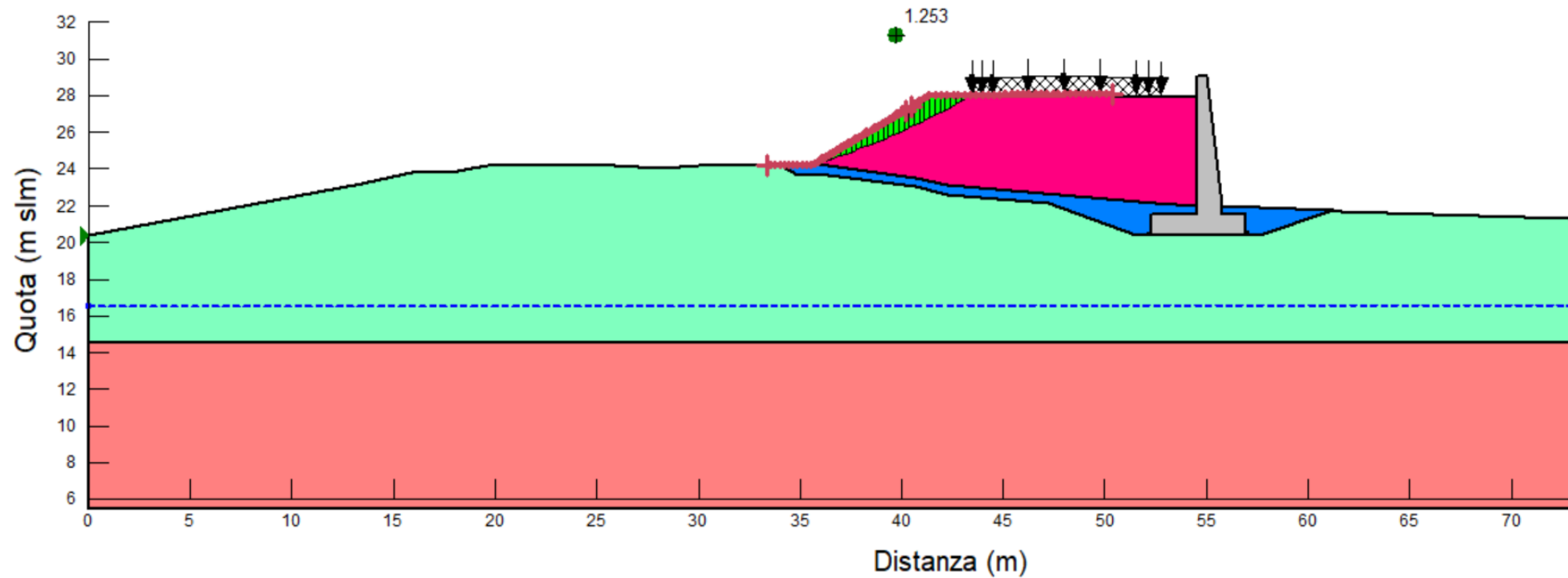


Figura 10.2: Rilevato delimitato da muro di sostegno, sez. 0+650 - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2 – Parametri drenati

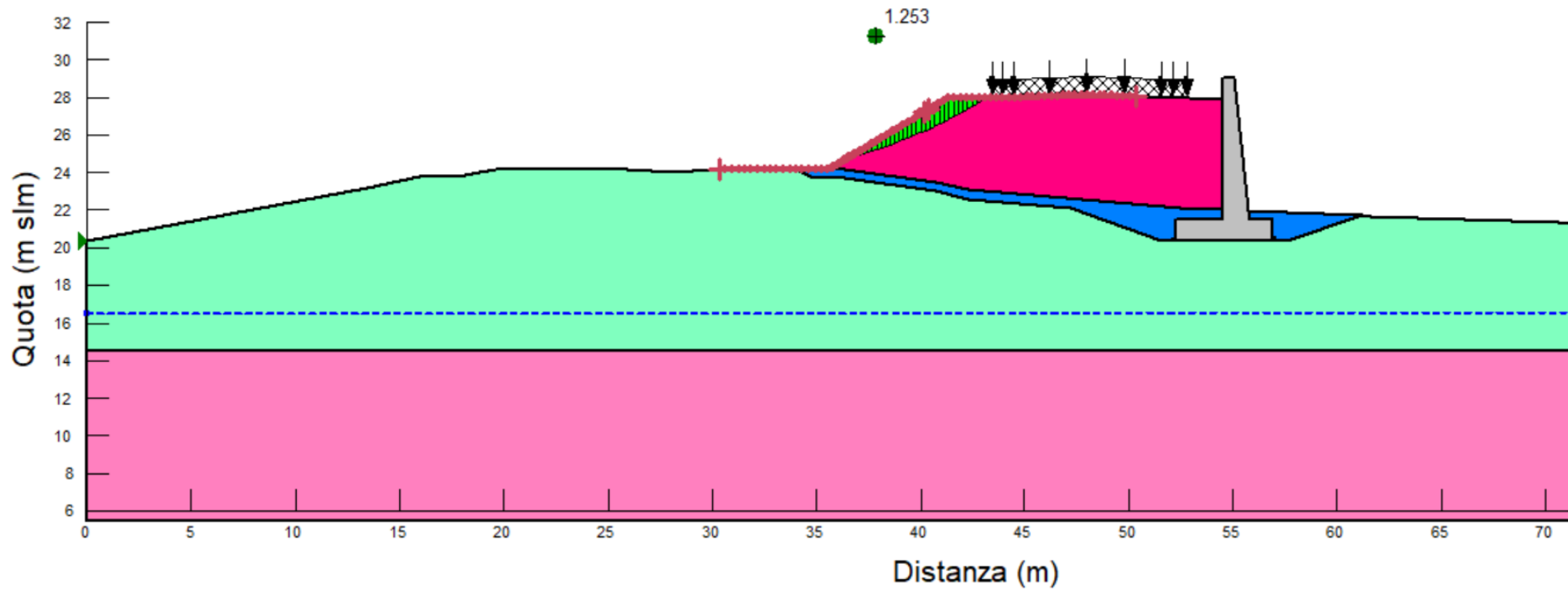


Figura 10.3: Rilevato delimitato da muro di sostegno, sez. 0+650 - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2 – Parametri non drenati

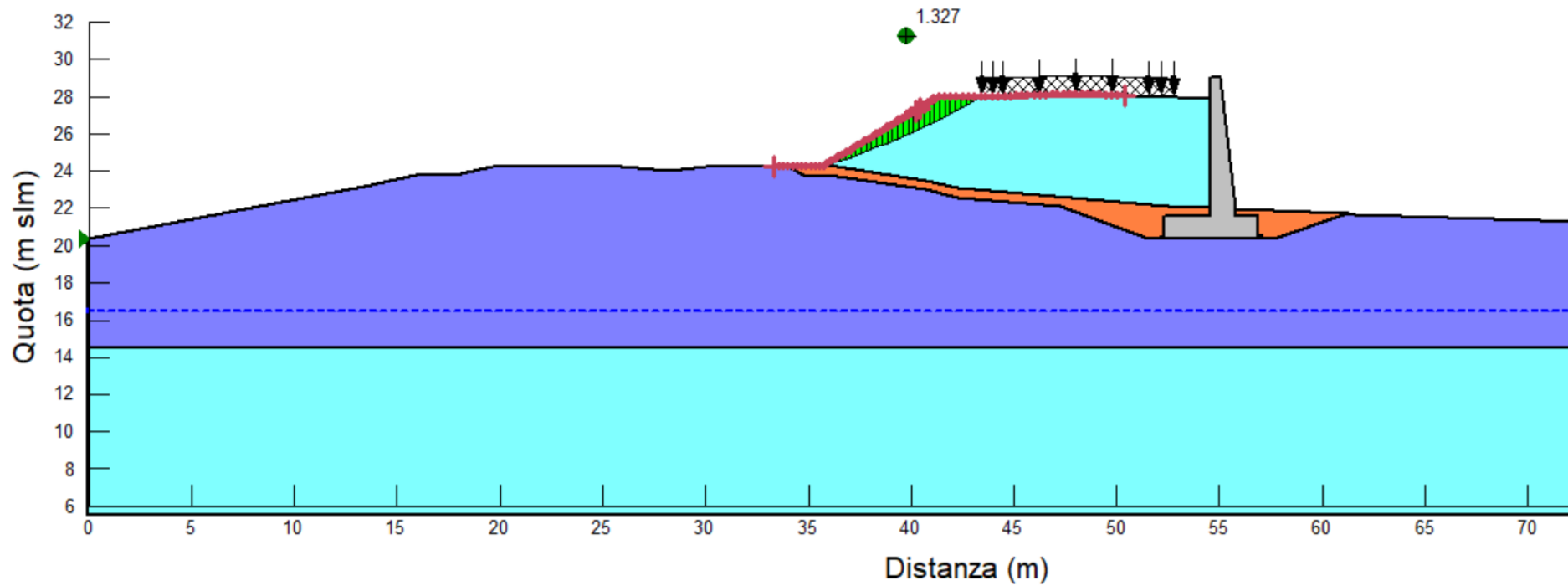



Figura 10.4: Rilevato delimitato da muro di sostegno, sez. 0+650 - Analisi di stabilità globale in campo sismico

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2ª FASE NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO					
	RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A

10.4 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

10.4.1 Modelli e fasi di calcolo

La sezione in esame, alla progressiva 0+650, è rappresentativa della prima tratta in rilevato della linea ferroviaria Vigna Clara-Val d'Ala. Il rilevato è costruito a nord del ramo ferroviario in disuso in uscita dalla stazione Vigna Clara. Il rilevato è delimitato a nord da un muro di sostegno; esso avrà quindi una sola scarpata a sud, con pendenza 3H:2V.

L'altezza del rilevato in progetto ha un'altezza variabile da 3.5 a 6.0m di cui nella zona centrale risulta avere uno spessore di circa 5.5 metri escluso il pacchetto di armamento ferroviario (ballast, traversine e rotaie), modellato nelle analisi come sovraccarico distribuito.

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 LS e per il materiale costituente i rilevati di progetto;
- 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 10.4, Tabella 10.5 e Tabella 10.6 si riportano i valori dei parametri di input per i modelli costitutivi sopracitati.

Tabella 10.4: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione al km 0+650 – 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	c'_k	c'_d	c_u	c_u	$E_{op.}$	OCR	k
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[-]	[m/s]
LS	19	28	23	0	0	75	54	11.25	2 fino a 9 m da pc; 1 oltre 9 m da pc	1.0E-07


 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO					
	RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A

Tabella 10.5: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione al km 0+650 – 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	c'_k	c'_d	c_u	c_u	OCR	e_0	C_c	C_r	$C_{\alpha s}$	k
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m/s]
AL1	19	22	17.9	10	8	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.	1.2 fino a 9 m da pc; 1 oltre 9 m da pc	0.85	0.27	0.05	0.003	1.0E-08

Tabella 10.6: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione al km 0+650 – 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	34.1	0.01	1.0E-07
SL	19	31	25.7	0	0	27.1 tra 32 m da pc e 37 m da pc; 26.5 tra 41 m da pc e 42.5 m da pc	27.1 tra 32 m da pc e 37 m da pc; 26.5 tra 41 m da pc e 42.5 m da pc	81.3 tra 32 m da pc e 37 m da pc; 79.4 tra 41 m da pc e 42.5 m da pc	0.15	1.0E-06
GLS	19	33	27.5	0	0	70.1	70.1	210.3	0.20	1.0E-05

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

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

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- Generazione dello stato tensionale iniziale geostatico;
- Scavo e realizzazione del muro di sostegno;
- Costruzione del rilevato;
- Consolidazione del rilevato per una durata di 6 mesi;

- Costruzione dell'armamento ferroviario sul rilevato per una durata di 30 giorni;
- Consolidazione del rilevato fino alla messa in opera (11 mesi);
- Consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio della linea ferroviaria per una durata di 6 mesi, 1 anno, 3 anni, 10 anni, 20 anni e 75 anni.

La *mesh* di calcolo utilizzata per le analisi è mostrata nella Figura 10.5.

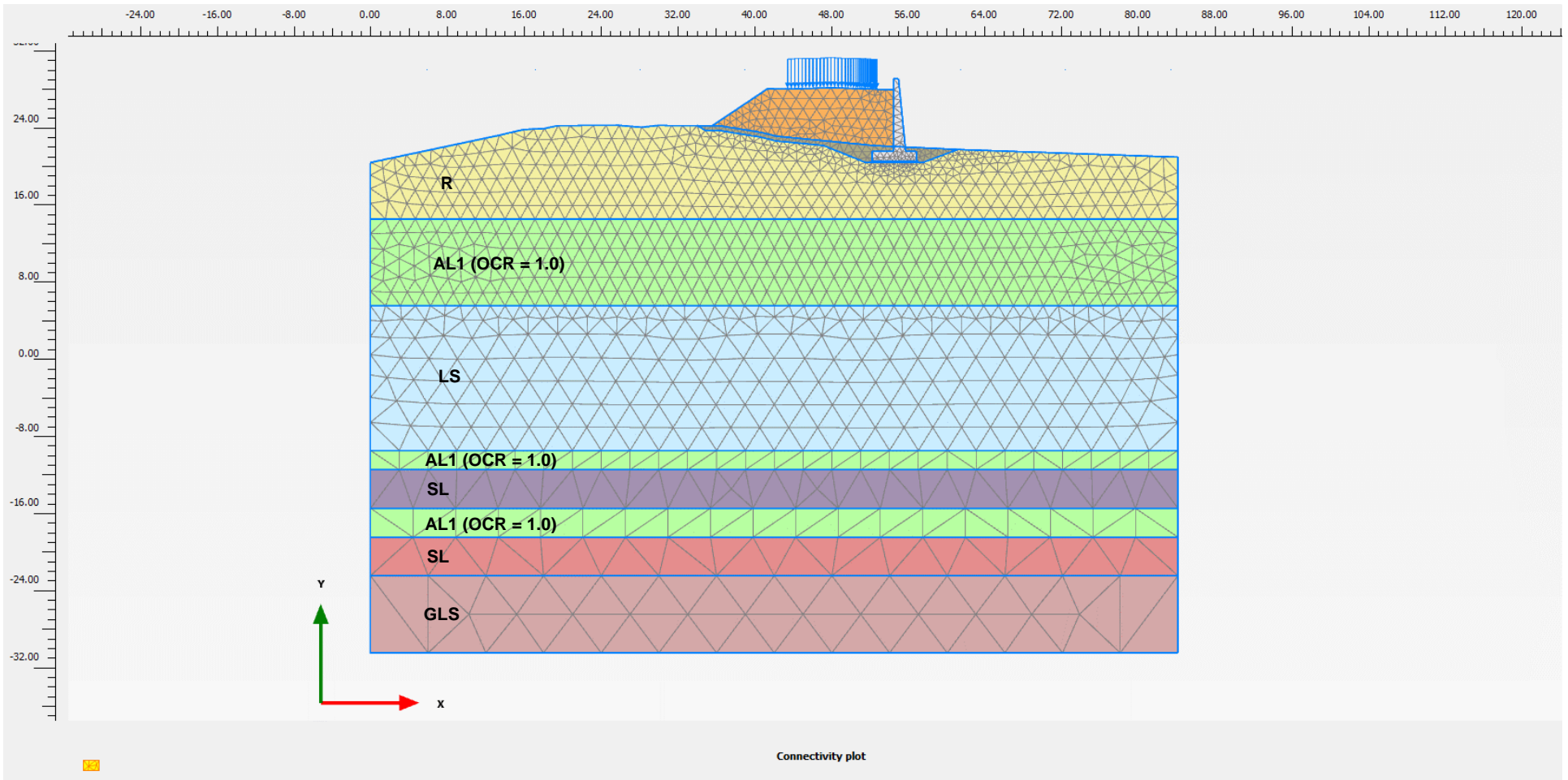



Figura 10.5: Modello rilevato Sez. 0+650

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 39 di 106

10.4.2 Risultati

Con riferimento al Manuale di Progettazione RFI DINIC MA CS 00 001 C (parte IV) (Doc. Rif. [3]), 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 10.6 è riportato lo spostamento verticale u_y lungo una sezione verticale in corrispondenza dell'asse del rilevato 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 del rilevato 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 10.7 è riportato lo spostamento verticale u_y lungo una sezione orizzontale in corrispondenza della base del rilevato al termine delle stesse fasi di calcolo.

Come mostrato nelle Figure Figura 10.6 e Figura 10.7, 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 10.14 e Figura 10.15).

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:

$$s_s = \sum_{i=1}^n \log\left(\frac{t}{t_{100,i}}\right) c_{\alpha\varepsilon,i} h_i = 3 \text{ cm}$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 40 di 106

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 $h_1 = 11$ 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 44 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.

Da Figura 10.8 a Figura 10.15 sono riportati i *contours* dei cedimenti totali per tutte le fasi di costruzione e le sovrappressioni in eccesso per le sole fasi di breve e lungo termine.

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.

- Costruzione rilevato
- Consolidazione (6 mesi)
- Posa armamento ferroviario
- Fine costruzione
- Messa in esercizio 6 mesi
- Messa in esercizio 1 anno
- Messa in esercizio 3 anni
- Messa in esercizio 10 anni
- Messa in esercizio 20 anni
- Messa in esercizio 75 anni

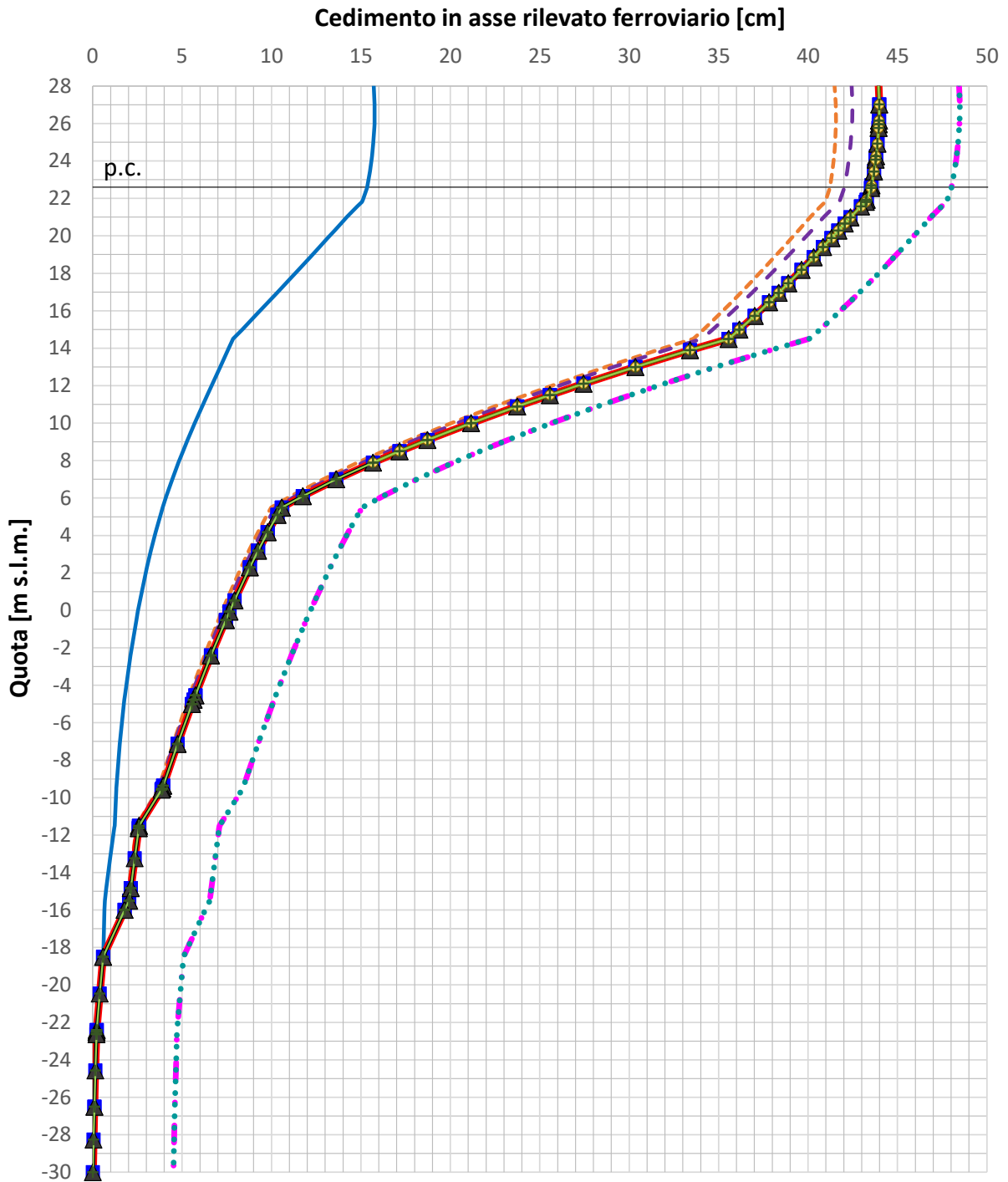


Figura 10.6: Rilevato sez. 0+650 – Spostamenti verticali in corrispondenza del centro del rilevato

RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI

COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 42 di 106
------------------	----------------	----------------	------------------------	-----------	---------------------

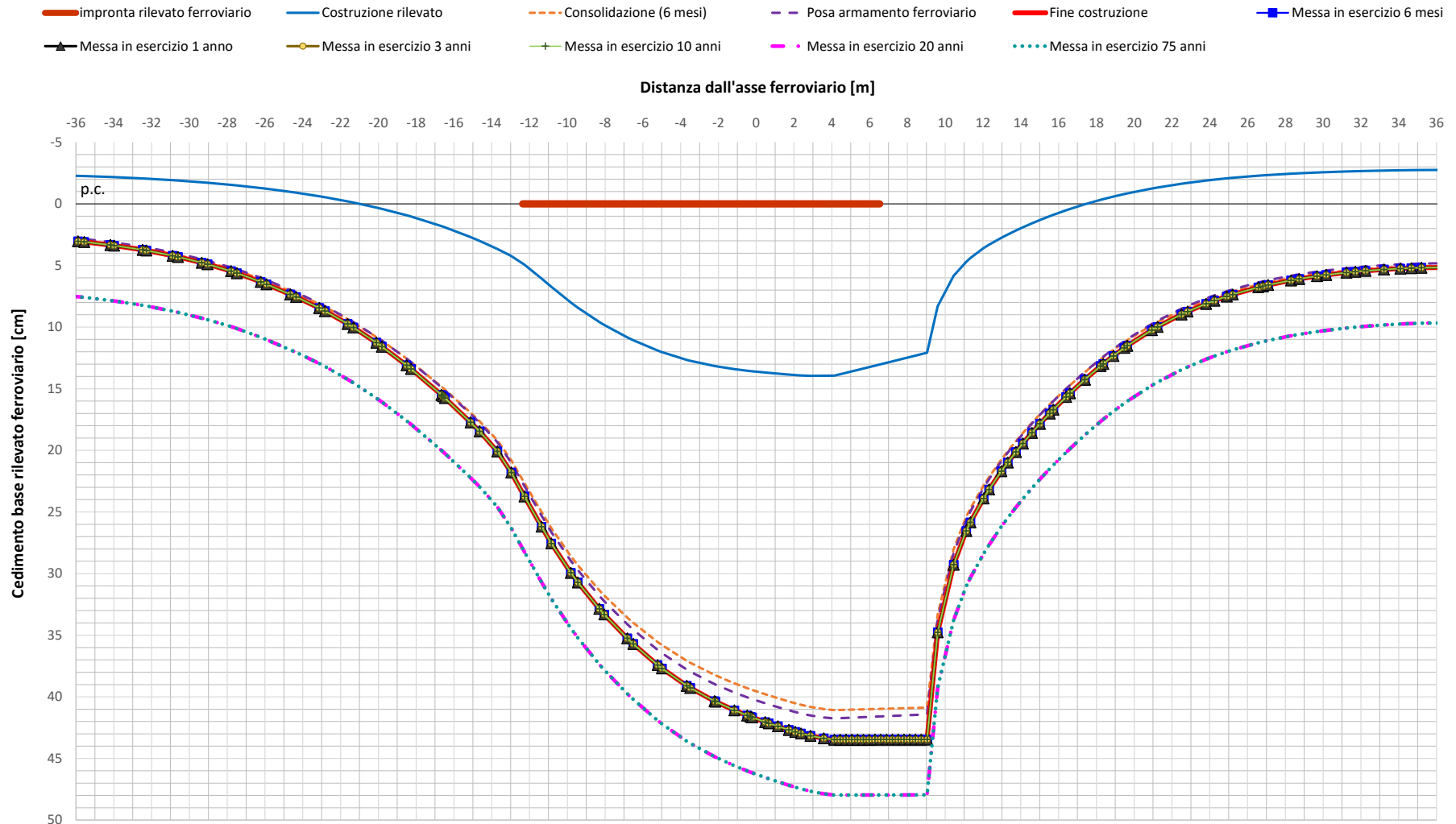


Figura 10.7: Rilevato sez. 0+650 – Spostamenti verticali in corrispondenza della base del rilevato ferroviario

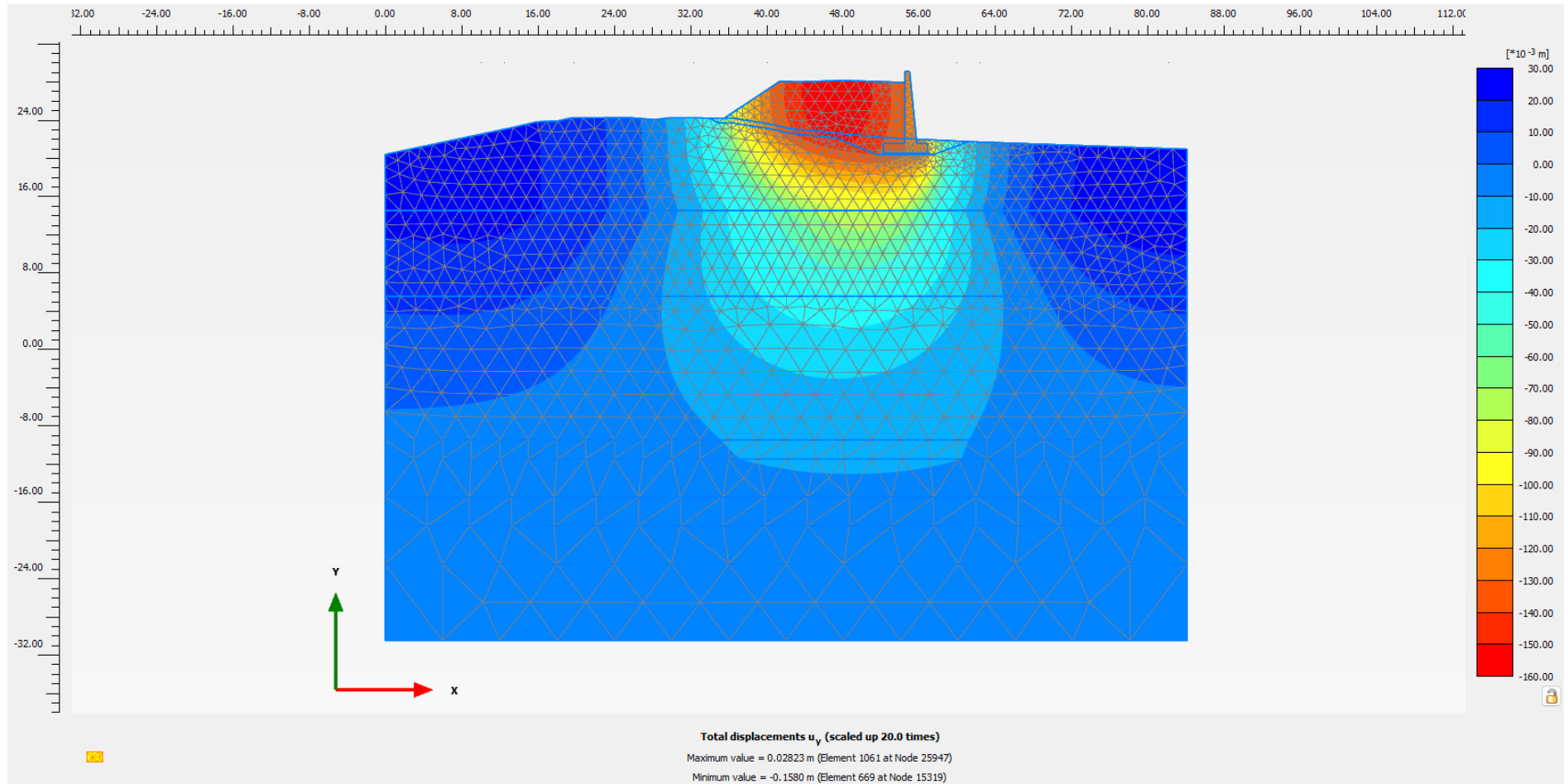


Figura 10.8: Rilevato sez. 0+650 – Spostamenti verticali termine costruzione

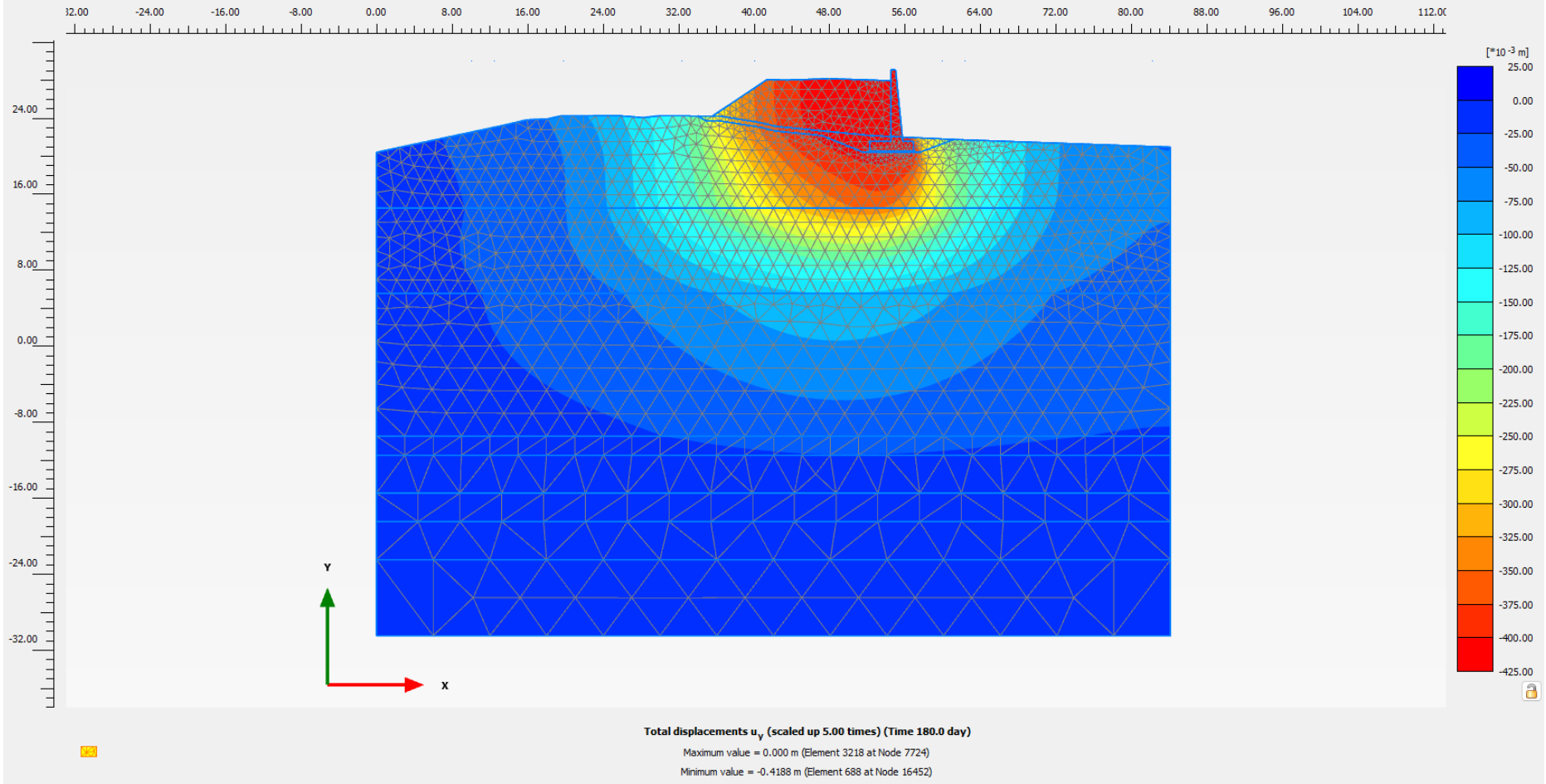


Figura 10.9: Rilevato sez. 0+650 – Spostamenti verticali a 6 mesi dalla costruzione del rilevato

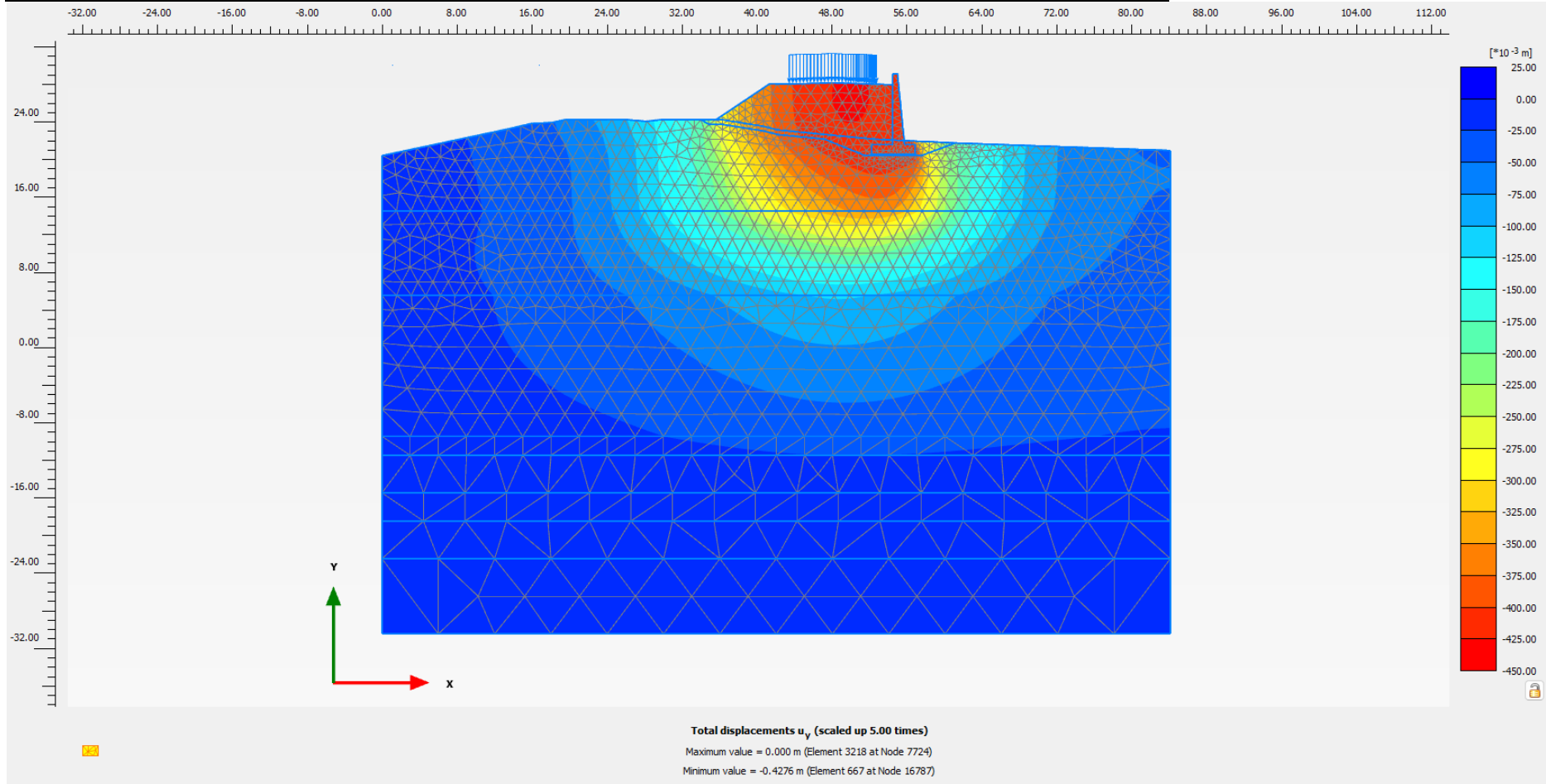


Figura 10.10: Rilevato sez. 0+650 – Spostamenti verticali a seguito dell'armamento ferroviario

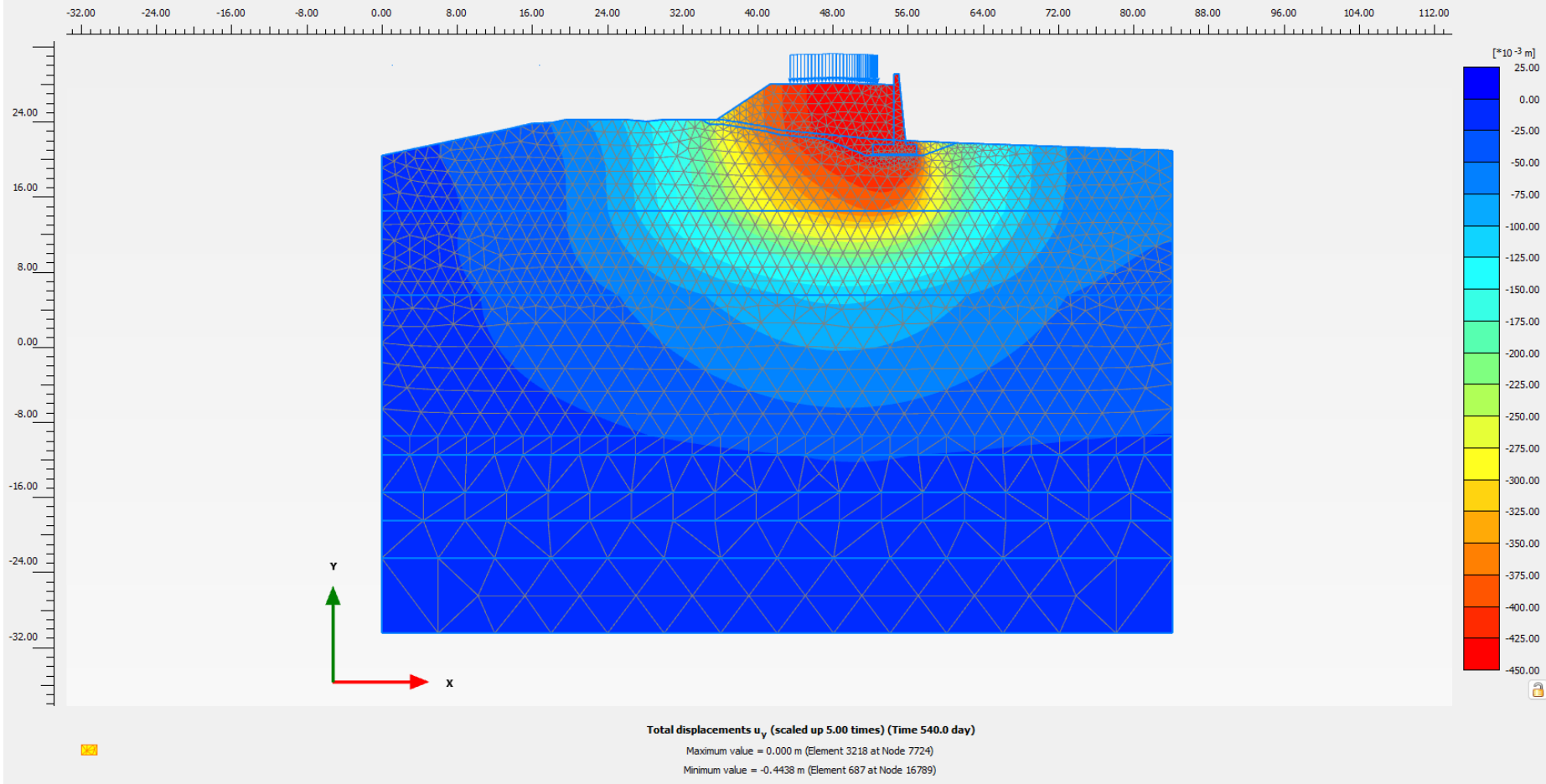


Figura 10.11: Rilevato sez. 0+650 – Spostamenti verticali a un anno da fine costruzione

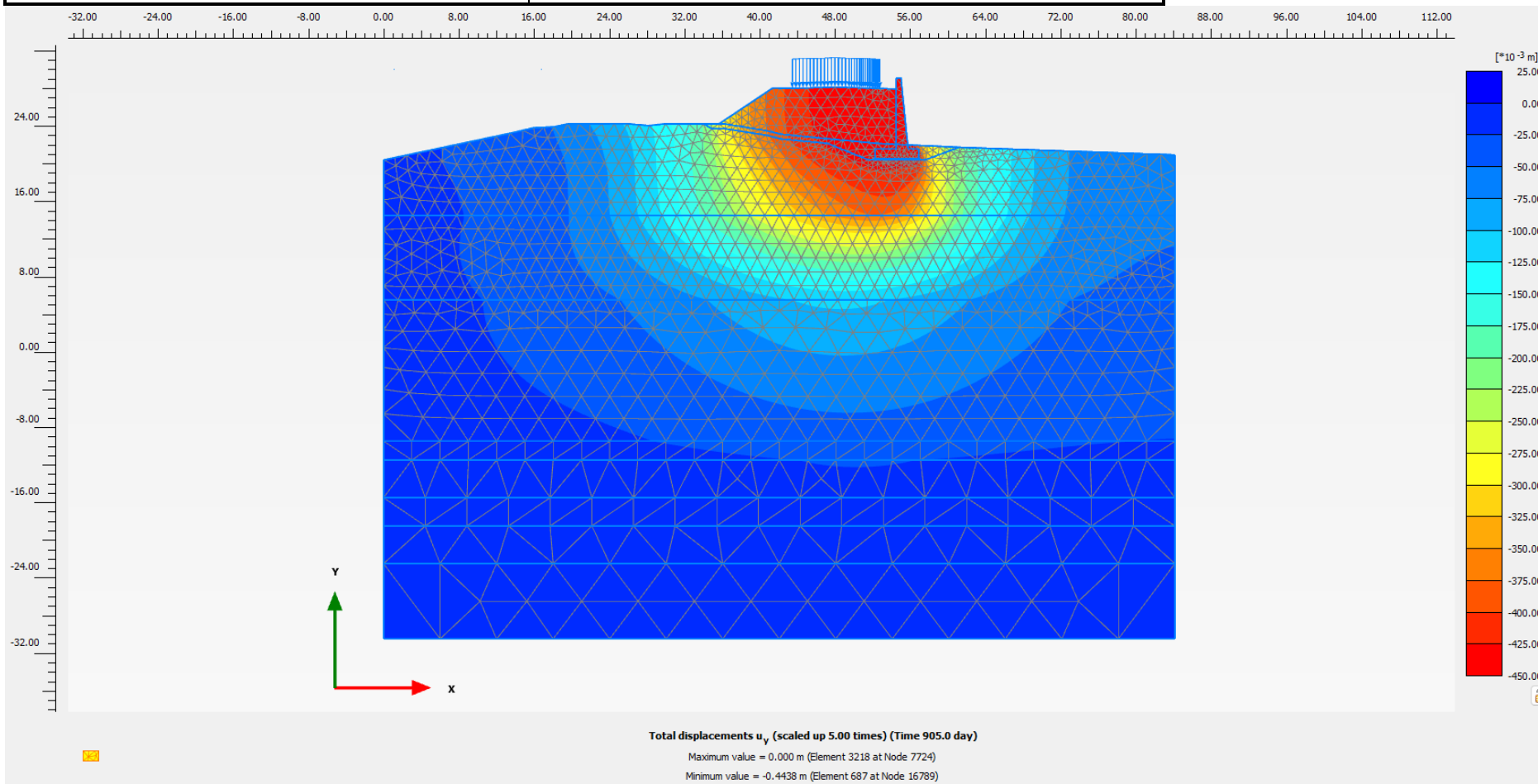


Figura 10.12: Rilevato sez. 0+650 – Spostamenti verticali a un anno dalla messa in esercizio

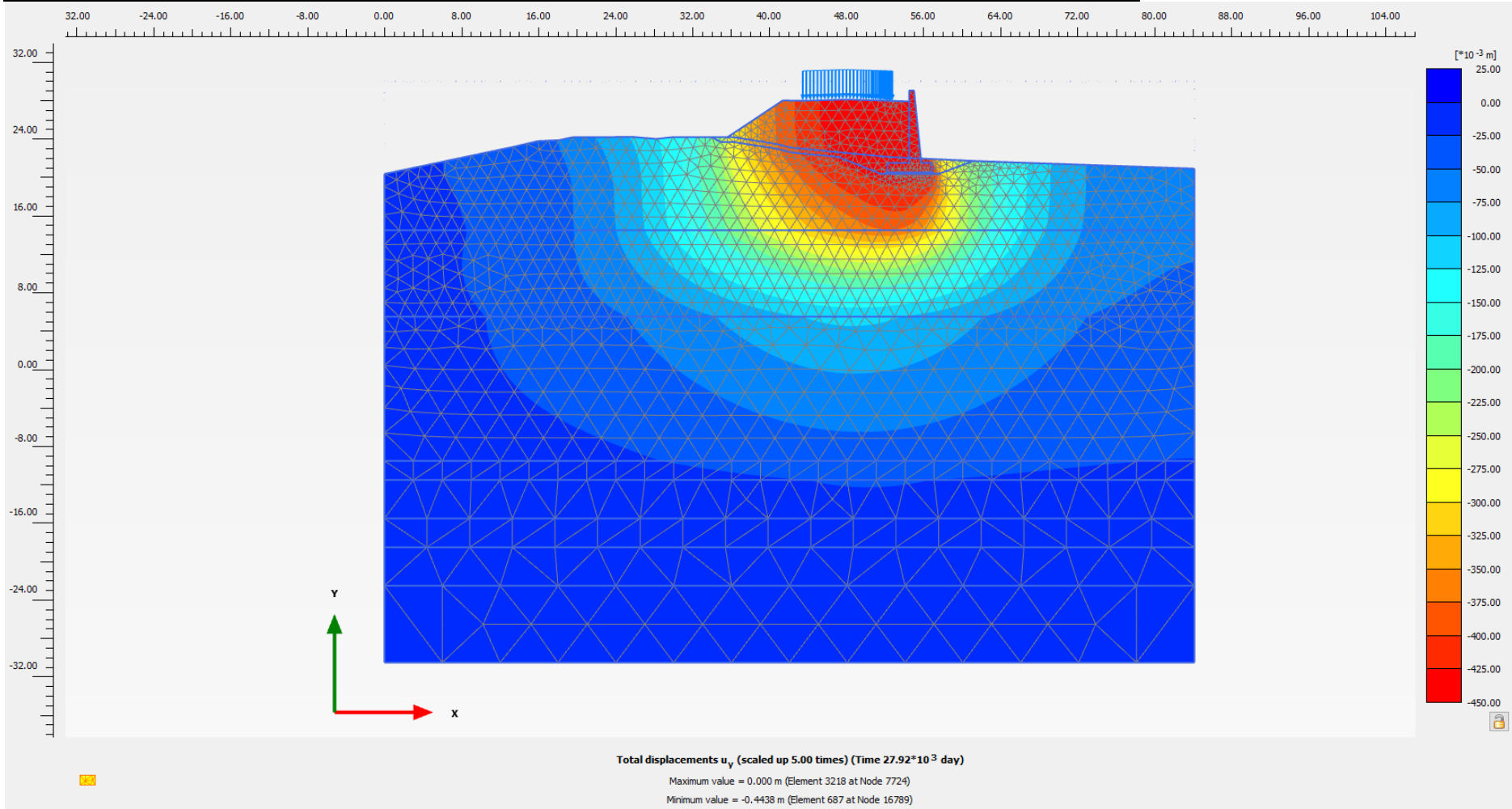


Figura 10.13: Rilevato sez. 0+650 – Spostamenti verticali lungo termine

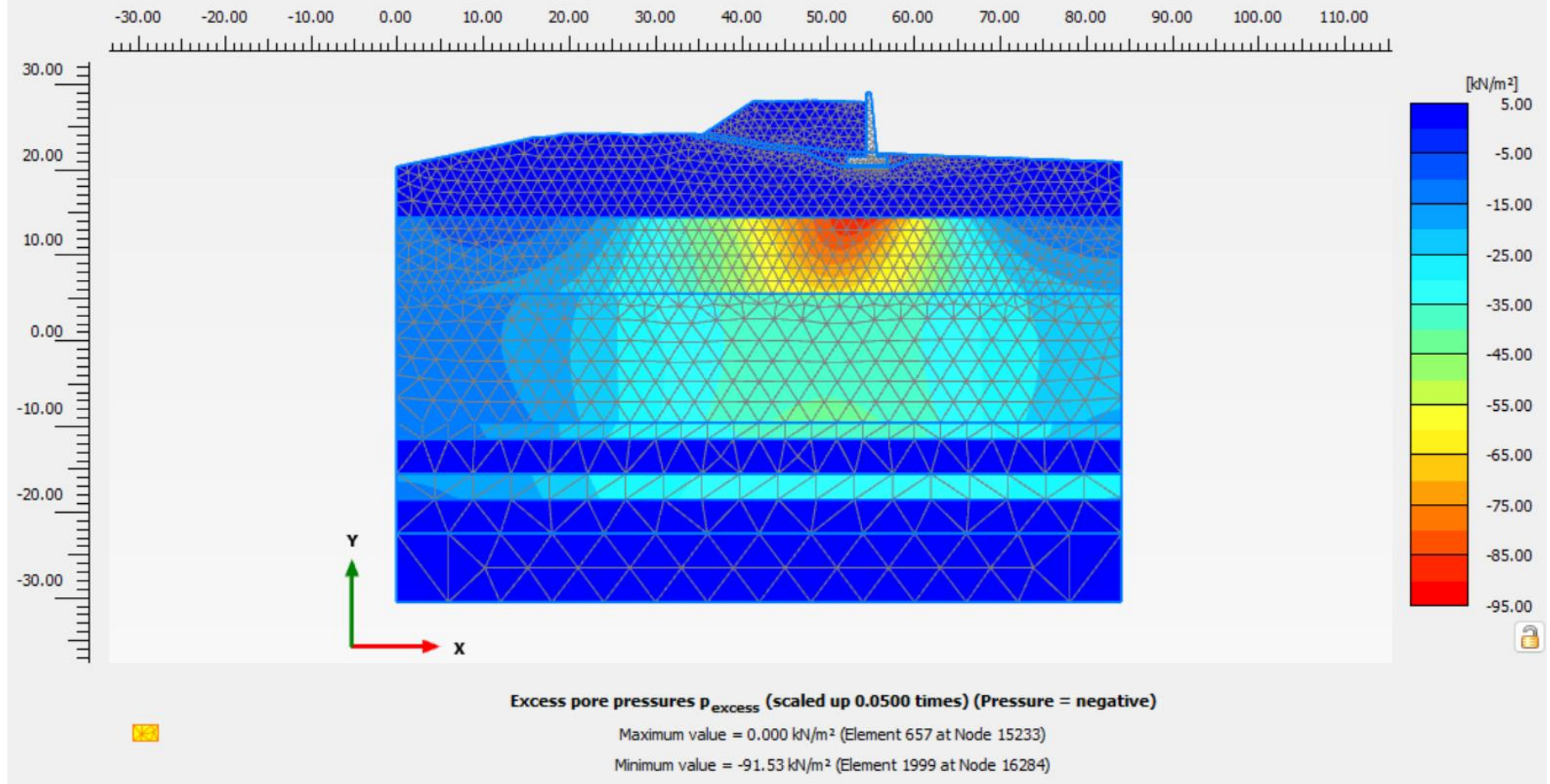


Figura 10.14: Rilevato sez. 0+650 – Sovrappressioni interstiziali Δu termine costruzione

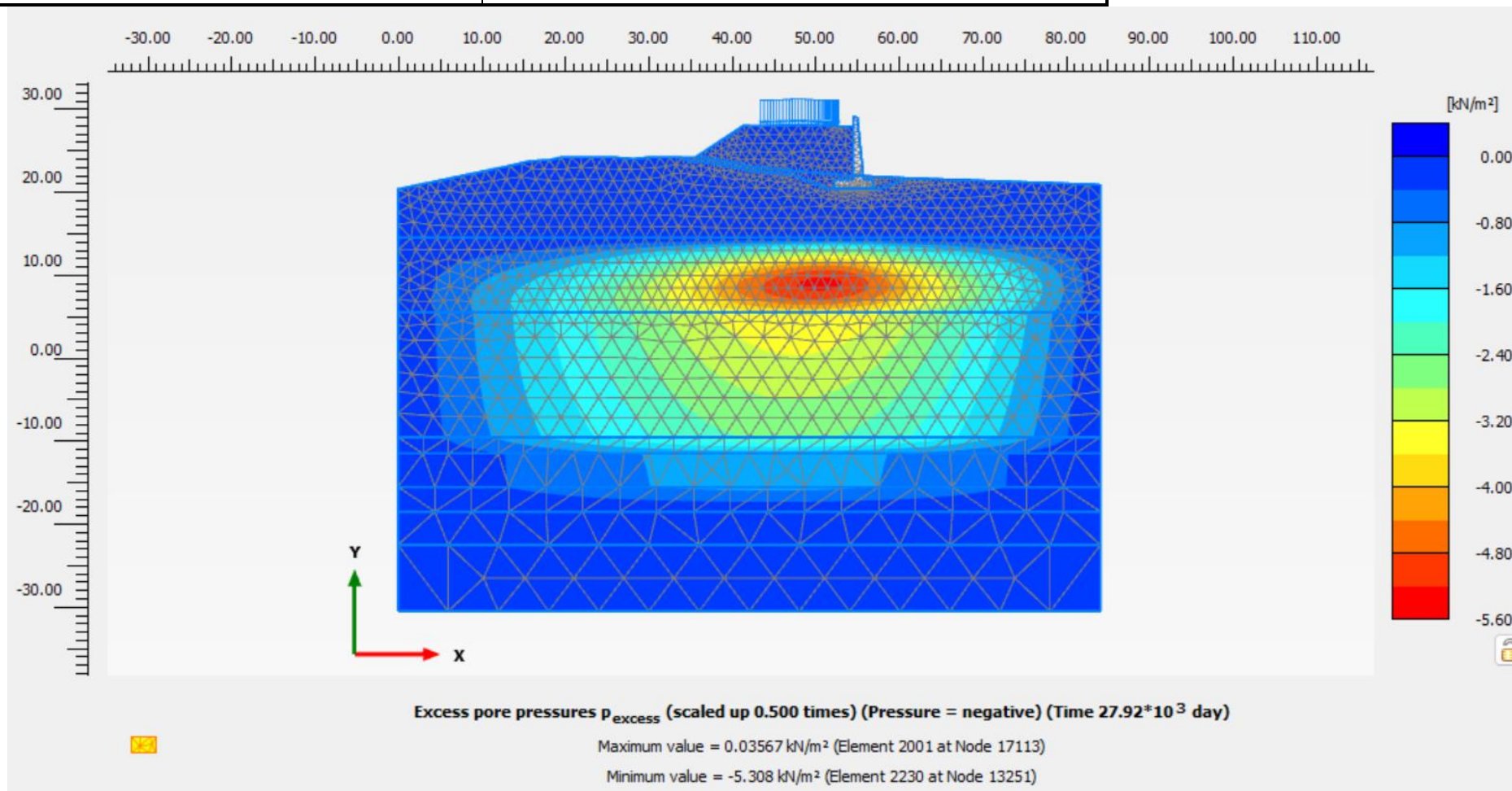



Figura 10.15: Rilevato sez. 0+650 – Sovrappressioni interstiziali Δu lungo termine

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 51 di 106

11. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 1+550

11.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

In Figura 11.1 si riporta uno stralcio del Profilo geotecnico (Doc. Rif. [12]) 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 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 al materiale antropico utilizzato per lo strato di scotico (50 cm al di sotto dello scatolare).

Si ricorda che, come definito al capitolo 7 del Doc. Rif. [1], per le verifiche SLE, finalizzate alla determinazione dei cedimenti, sono richiesti i parametri caratteristici.

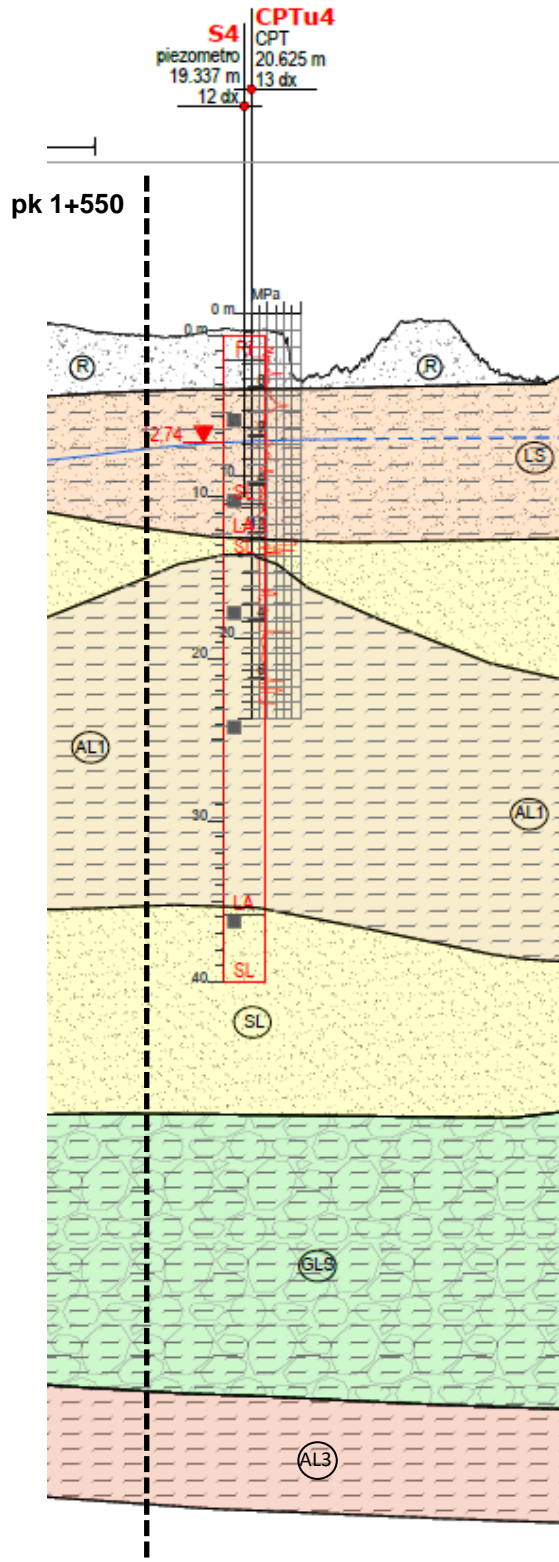


Figura 11.1: Stralcio del Profilo geotecnico in corrispondenza della sezione al km 1+550


Tabella 11.1: Stratigrafia di calcolo per la sezione 1+550

Strato	Profondità da [m da p.c.]	Profondità a [m da p.c.]	Descrizione
R	0	3.5	Materiale rimaneggiato assimilabile a riporto antropico e/o terreno vegetale 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.
LS	3.5	13	Limo argilloso debolmente sabbioso e/o limo sabbioso debolmente argilloso con frequenti livelletti di sabbia limosa e rara ghiaia. Rare tracce di materiale organico.
SL	13	16	Sabbia da debolmente limosa a con limo, talvolta ghiaiosa. Rare tracce di materiale organico.
AL1	16	36	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	48	Sabbia da debolmente limosa a con limo, talvolta ghiaiosa. Rare tracce di materiale organico.
GLS	48	-	Ghiaia poligenica eterometrica con sabbia debolmente limosa e/o sabbia con ghiaia debolmente argillosa.

Tabella 11.2: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 1+550 – 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 M2	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	-	-
LS	19	28	23	0	0	75	54
SL	19	31	25.7	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
GLS	19	33	27.5	0	0	-	-

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli ad una quota di circa 6.4 m dal piano campagna.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 54 di 106

11.2 CARICHI DI PROGETTO

I carichi considerati nell'analisi derivano dal modello strutturale 3D del concio centrale dello scatolare. Tale concio, di larghezza 27m e lunghezza 32m, è quello maggiormente caricato dell'intera struttura; pertanto, le analisi descritte nel presente capitolo fanno riferimento a tale concio per la definizione della tipologia di fondazione dello scatolare. In Tabella 11.3 sono riportati i valori delle risultanti delle azioni applicate nel baricentro del concio nel modello strutturale; la relativa convenzione sui segni è indicata in Figura 11.2. Le risultanti sono valutate a estradosso fondazione nel modello strutturale 3D ma tengono conto del peso proprio della platea di fondazione, di spessore pari a 1.2m, denominato W_{platea} . Tale peso proprio è stato scorporato dal totale in quanto la platea è modellata con elementi *plate* oppure con elementi volume nei modelli di calcolo descritti nel seguito; pertanto, il suo peso proprio è già applicato nelle analisi. Sulla base dei carichi $(G1 + G2) - W_{platea}$ è stata quindi valutata la distribuzione di pressioni equivalente applicata a estradosso fondazione, considerando il solo momento M_x e il momento M_x in combinazione con il momento M_y ; i valori massimi e minimi di pressione sono riportati in Tabella 11.4. Sulla base di tali valori nei modelli di calcolo descritti nel seguito è stata applicata una pressione media equivalente pari a 90kPa. La quota parte dovuta all'armamento ferroviario è stata valutata in via semplificata detraendo da tale pressione media totale un'aliquota pari a 15kPa, considerando cautelativamente ai fini delle valutazioni di cedimento atteso il peso dovuto all'armamento ferroviario come uniformemente distribuito lungo l'intera larghezza dello scatolare.

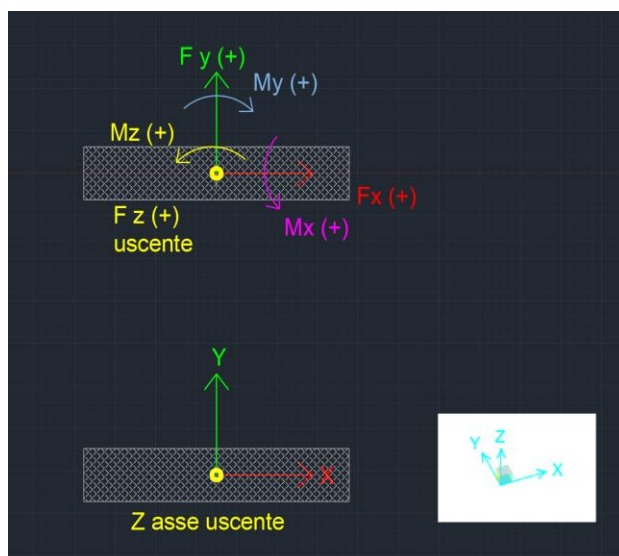



Figura 11.2: Convenzione sui segni delle azioni in fondazione valutate dal modello strutturale dello scatolare

Tabella 11.3: Scarichi in fondazione – Concio centrale

Tipologia carico	N [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]
G1	-81770	27271	-10575
G2	-19139	15563	0
G1 + G2	-100909	42834	-10575
(G1 + G2) - W _{platea}	-74989	42834	-10575

Tabella 11.4: Scarichi in fondazione – Concio centrale – Pressioni equivalenti

Tipologia carico	Momenti agenti	σ _{max} [kPa]	σ _{min} [kPa]
(G1 + G2) - W _{platea}	M _x	98	76
	M _x + M _y	96	78

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 56 di 106

11.3 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

11.3.1 Introduzione

Come anticipato nel paragrafo 11.2, la valutazione dei cedimenti è stata effettuata considerando una sezione rappresentativa del concio centrale dello scatolare, in corrispondenza della progressiva 1+550. La quota d'imposta delle fondazioni è stata assunta a +17.5 m slm.

Inizialmente è stata effettuata un'analisi 2D in cui la platea di fondazione della stazione è stata modellata con un elemento *plate*, a cui sono state applicate le pressioni valutate dall'analisi strutturale della stazione (si veda il paragrafo 11.2); tale analisi è denominata nel seguito Analisi A. I risultati di quest'analisi indicano cedimenti a lungo termine dell'ordine di circa 40 cm, non compatibili con l'esercizio della struttura; pertanto si è reso necessario considerare tipologie di fondazione alternative alla platea su terreno naturale, con impiego di tecniche di miglioramento del terreno. Di seguito si riassumono le tipologie di fondazione analizzate:

- Platea su terreno migliorato tramite colonne deep mixing (Analisi B)
- Platea su terreno migliorato tramite inclusioni rigide intestate nell'unità geotecnica AL1 (Analisi C)
- Platea su terreno migliorato tramite inclusioni rigide intestate nell'unità geotecnica SL (Analisi D)

Nei successivi paragrafi si riportano i dettagli delle analisi sopra citate, come segue:

- Nel paragrafo 11.3.2 sono descritti i modelli costitutivi dei terreni e degli elementi strutturali adoperati nelle analisi e i relativi parametri di input
- Nel paragrafo 11.3.3 sono descritte le fasi di calcolo analizzate per ciascun modello
- Nei paragrafi 11.3.6, 11.3.8 e 11.3.9 sono illustrati i singoli modelli di calcolo e i risultati di ciascuna analisi.

11.3.2 Modelli costitutivi e proprietà strutturali

Per il calcolo dei cedimenti si sono impiegati i seguenti modelli costitutivi per i terreni, implementati all'interno del codice di calcolo Plaxis 2D (utilizzato per le Analisi A e B) e Plaxis 3D (utilizzato per le Analisi C e D):

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

La stratigrafia di calcolo utilizzata è riportata in Tabella 11.1. In Tabella 11.5, Tabella 11.6 e Tabella 11.7 si riportano i valori dei parametri di input per i modelli costitutivi sopracitati.

Tabella 11.5: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 1+550 – 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]
LS	19	28	23	0	0	75	54	11.25	2 fino a 9 m da pc; 1 oltre 9 m da pc	1.0E-07
R	18.5	28.5	23.5	0	0	-	-	11.25	-	1.0E-05

Tabella 11.6: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 1+550 – 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	22	17.9	10	8	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	1.2 fino a 9 m da pc; 1 oltre 9 m da pc	0.85	0.27	0.05	0.003	1.0E-08

Tabella 11.7: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 1+550 – 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]
SL	19	31	25.7	0	0	29.8	29.8	89.3	0.01	1.0E-06
GLS	19	33	27.5	0	0	79.2	79.2	237.7	0.01	1.0E-05


Per quanto riguarda i materiali strutturali, sono state fatte le seguenti assunzioni relativamente ai modelli costitutivi e relativi parametri:

- Il calcestruzzo della platea di fondazione è stato modellato come materiale elastico-lineare con peso dell'unità di volume $\gamma = 25\text{kN/m}^3$ e modulo di Young $E = 28\text{GPa}$
- Il calcestruzzo delle inclusioni rigide è stato modellato come materiale con criterio di rottura alla Tresca, caratterizzato da peso dell'unità di volume $\gamma = 24\text{kN/m}^3$, modulo di Young $E = 28\text{GPa}$, coesione $c = 12.5\text{MPa}$ e resistenza a trazione $f_{ctk} = 200\text{kPa}$ (valori rappresentativi assumendo classe di calcestruzzo C25/30).

11.3.3 Fasi di calcolo

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- generazione dello stato tensionale iniziale geostatico;
- scavo e installazione degli elementi di trattamento (per le Analisi B, C e D);
- installazione della platea di fondazione e dello scatolare;
- costruzione della stazione, simulata tramite l'attivazione del carico uniformemente distribuito rappresentativo del peso proprio delle strutture (75kPa), per una durata di 6 mesi;
- costruzione dell'armamento ferroviario, simulata tramite l'attivazione del carico uniformemente distribuito rappresentativo del peso proprio strutturale e dei carichi dovuti all'armamento ferroviario (90kPa), per una durata di 30 giorni e successiva consolidazione di 11 mesi fino alla messa in opera della stazione;
- 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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 59 di 106

11.3.4 Fondazione diretta su terreno naturale (Analisi A)

Come anticipato nel paragrafo 11.3.1, in prima istanza si è considerata una fondazione diretta per lo scatolare di stazione, il cui comportamento è stato studiato tramite un'analisi 2D (Analisi A). Il modello utilizzato per questa analisi è mostrato nella Figura 11.5. Il modello comprende una sezione rappresentativa del concio centrale dello scatolare, che come descritto nel paragrafo 11.2 rappresenta la sezione più onerosa in termini di geometria e carichi applicati. Nell'analisi la platea di fondazione è stata modellata con un elemento *plate*, a cui sono state applicate le pressioni valutate dall'analisi strutturale della stazione (si veda il par. 11.2).

La stratigrafia adottata nell'analisi è riportata in Tabella 11.1. I modelli costitutivi adottati per i terreni e per i materiali strutturali e i relativi parametri sono riportati nel paragrafo 11.3.2. Le fasi di calcolo analizzate sono descritte nel paragrafo 11.3.3.

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 del rilevato 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 dell'intradosso dello scatolare al termine delle stesse fasi di calcolo.

I risultati dell'analisi sono mostrati nelle figure seguenti. In particolare, in Figura 11.6, Figura 11.7, Figura 11.8 e Figura 11.9 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.



PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE

NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD

TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO

**RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI
E SCATOLARI**

COMMESSA
NR4E

LOTTO
12R09

CODIFICA
RH

DOCUMENTO
GE0006001

REV.
A

FOGLIO
60 di 106

Dai risultati si evince che la soluzione con platea su terreno naturale comporta cedimenti dell'ordine di 10 cm al termine della costruzione e 40 cm a lungo termine, non compatibili con l'esercizio della struttura; pertanto, sono state considerate soluzioni alternative con interventi di miglioramento dei terreni di fondazione, dettagliate nei paragrafi successivi.

- Costruzione scatolare
- Fine costruzione
- Messa in esercizio 3 anni
- Messa in esercizio 75 anni
- - - Consolidazione (6 mesi)
- Messa in esercizio 6 mesi
- +— Messa in esercizio 10 anni
- - - Posa armamento ferroviario
- ▲— Messa in esercizio 1 anno
- Messa in esercizio 20 anni

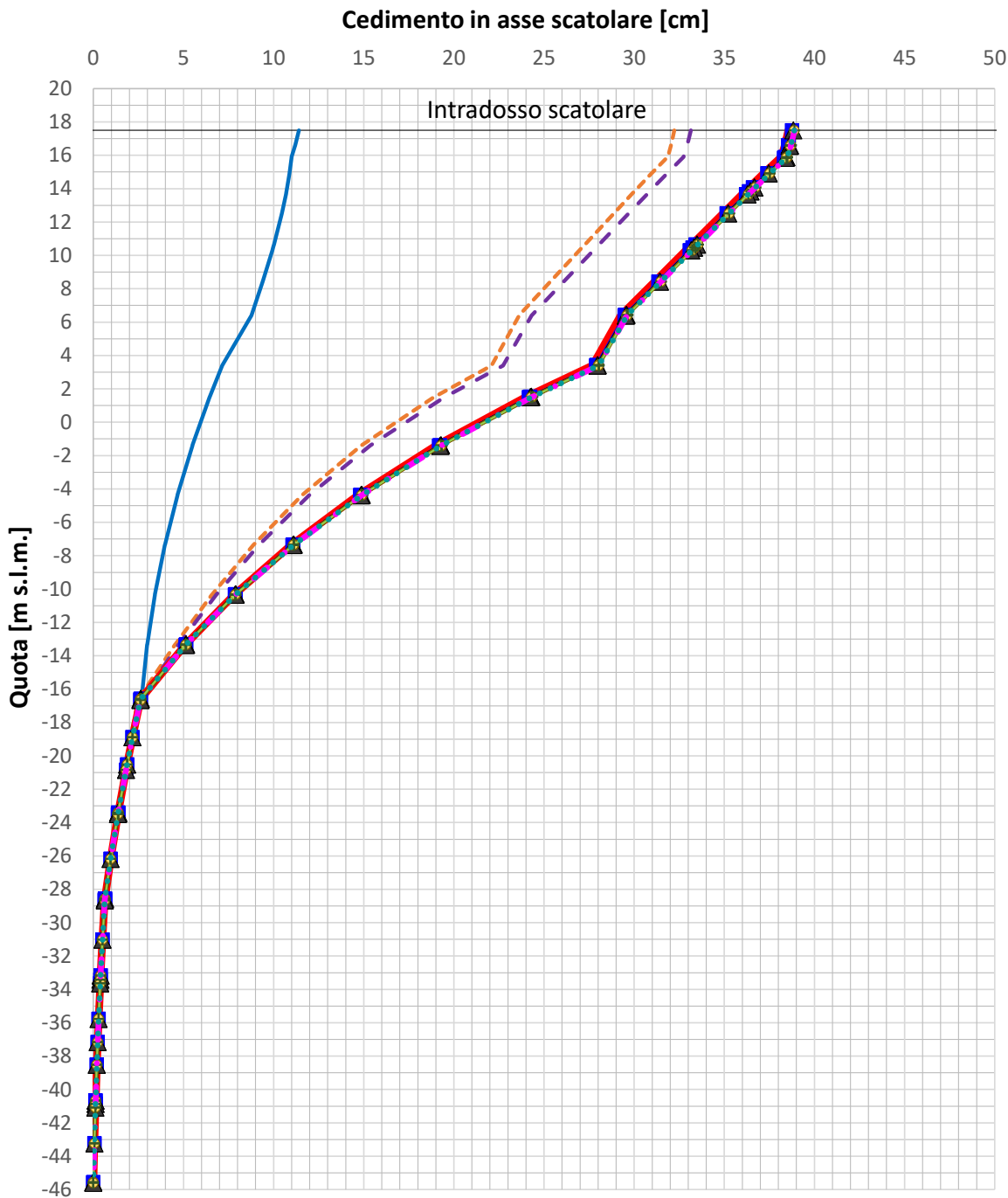


Figura 11.3: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi A – Spostamenti verticali in corrispondenza dell'asse dello scatolare

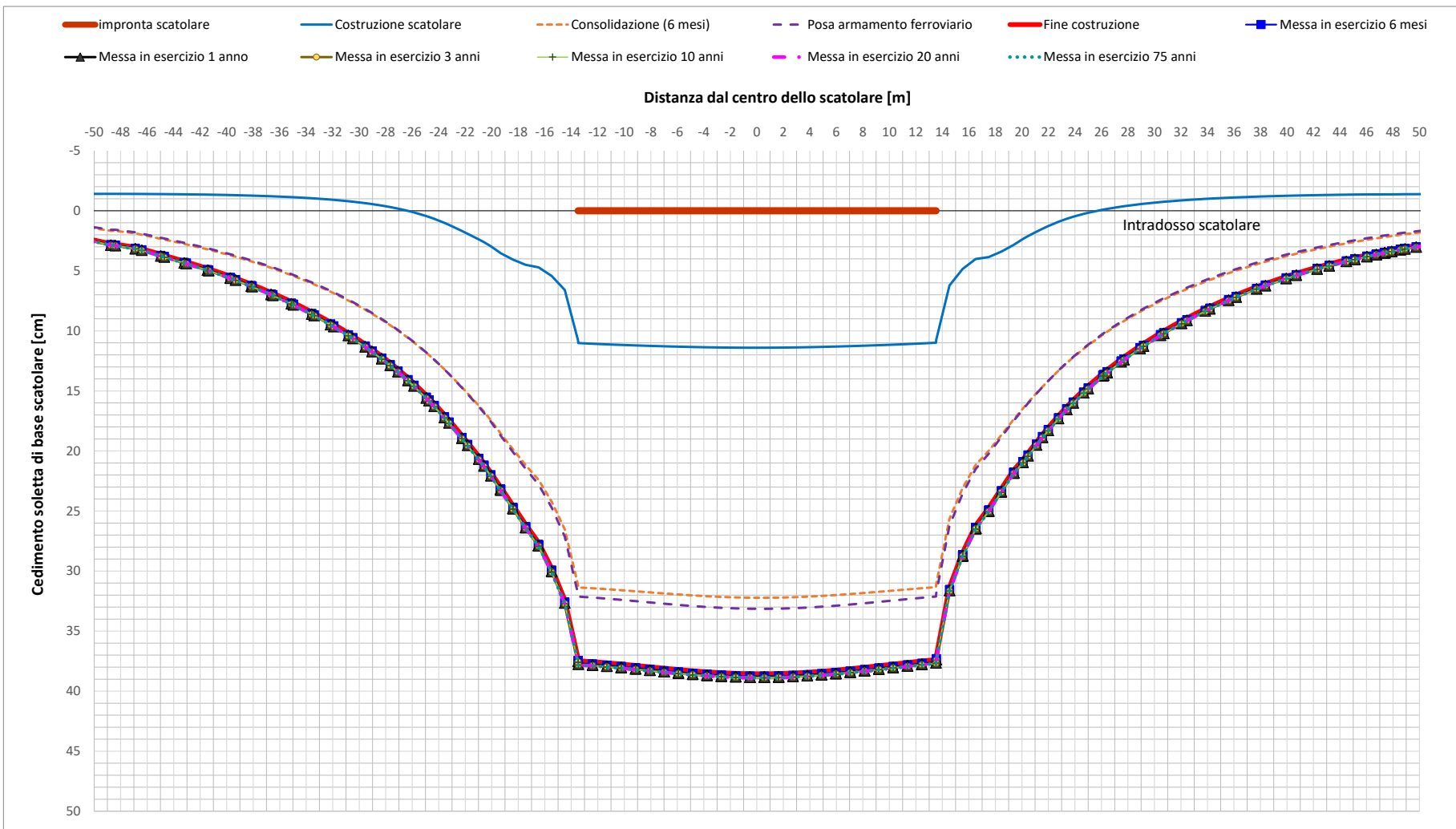


Figura 11.4: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi A – Profilo trasversale degli spostamenti verticali lungo lo scatolare

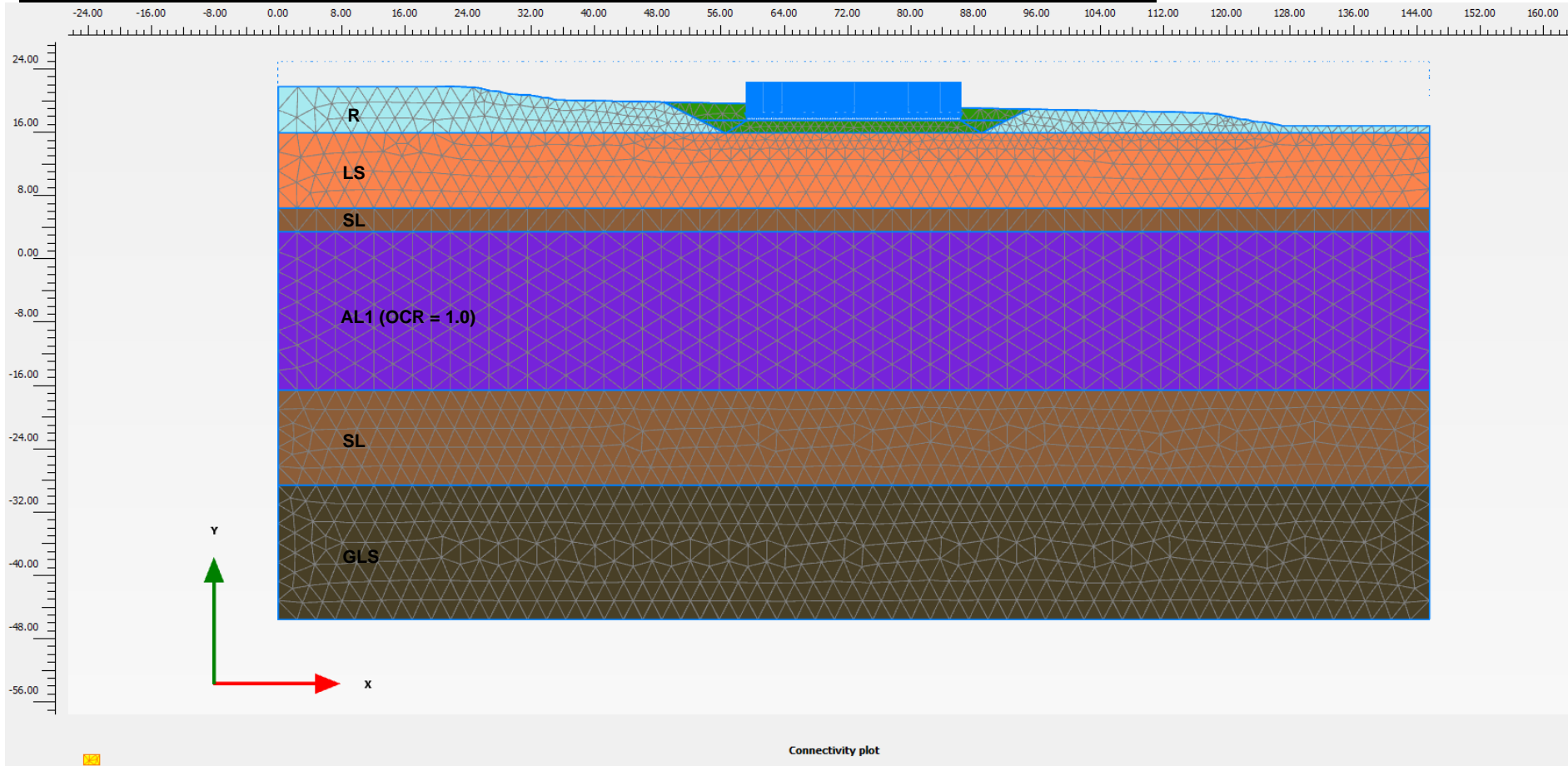


Figura 11.5: Modello Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi A

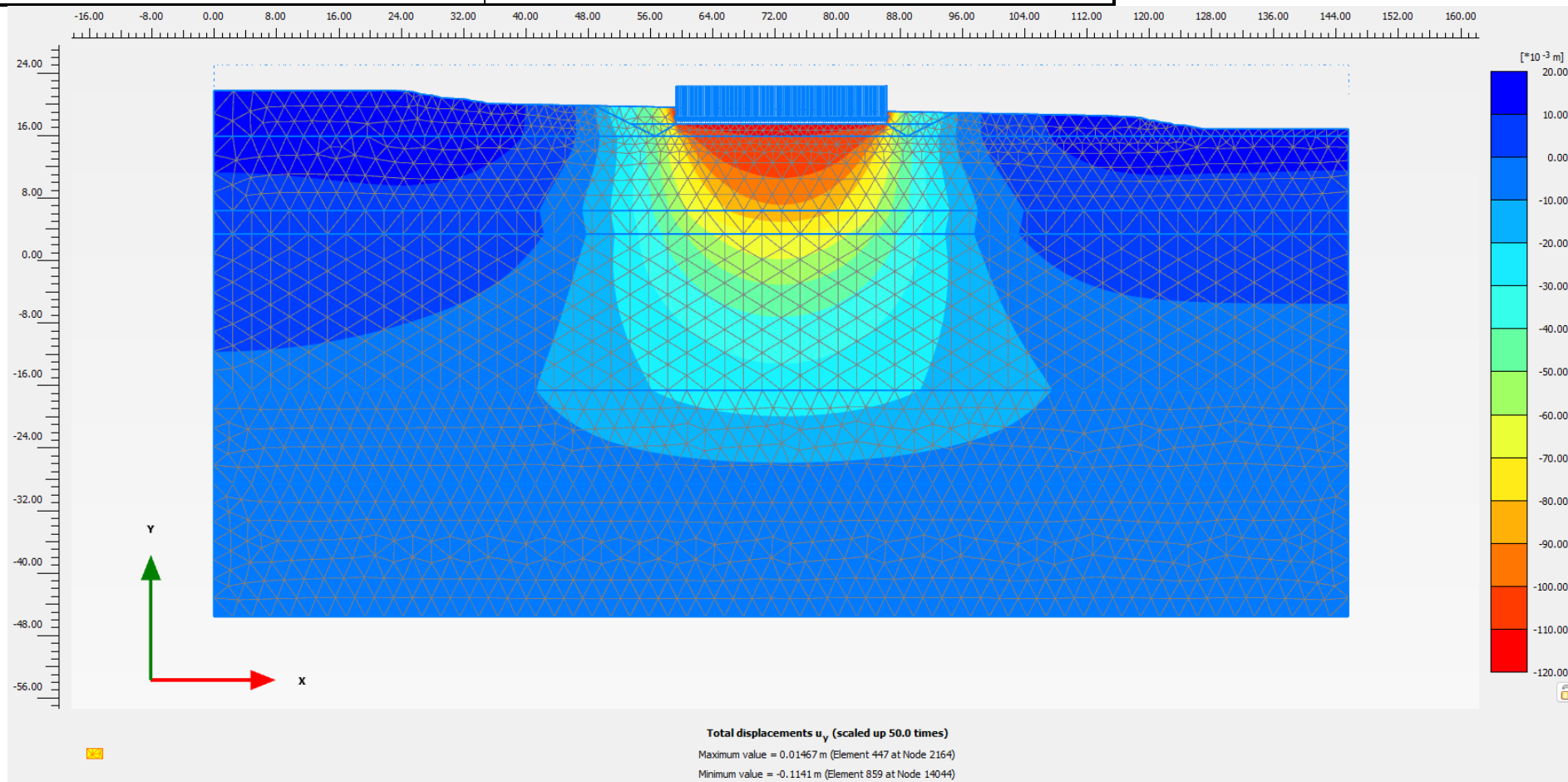


Figura 11.6: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi A – Spostamenti verticali al termine della costruzione

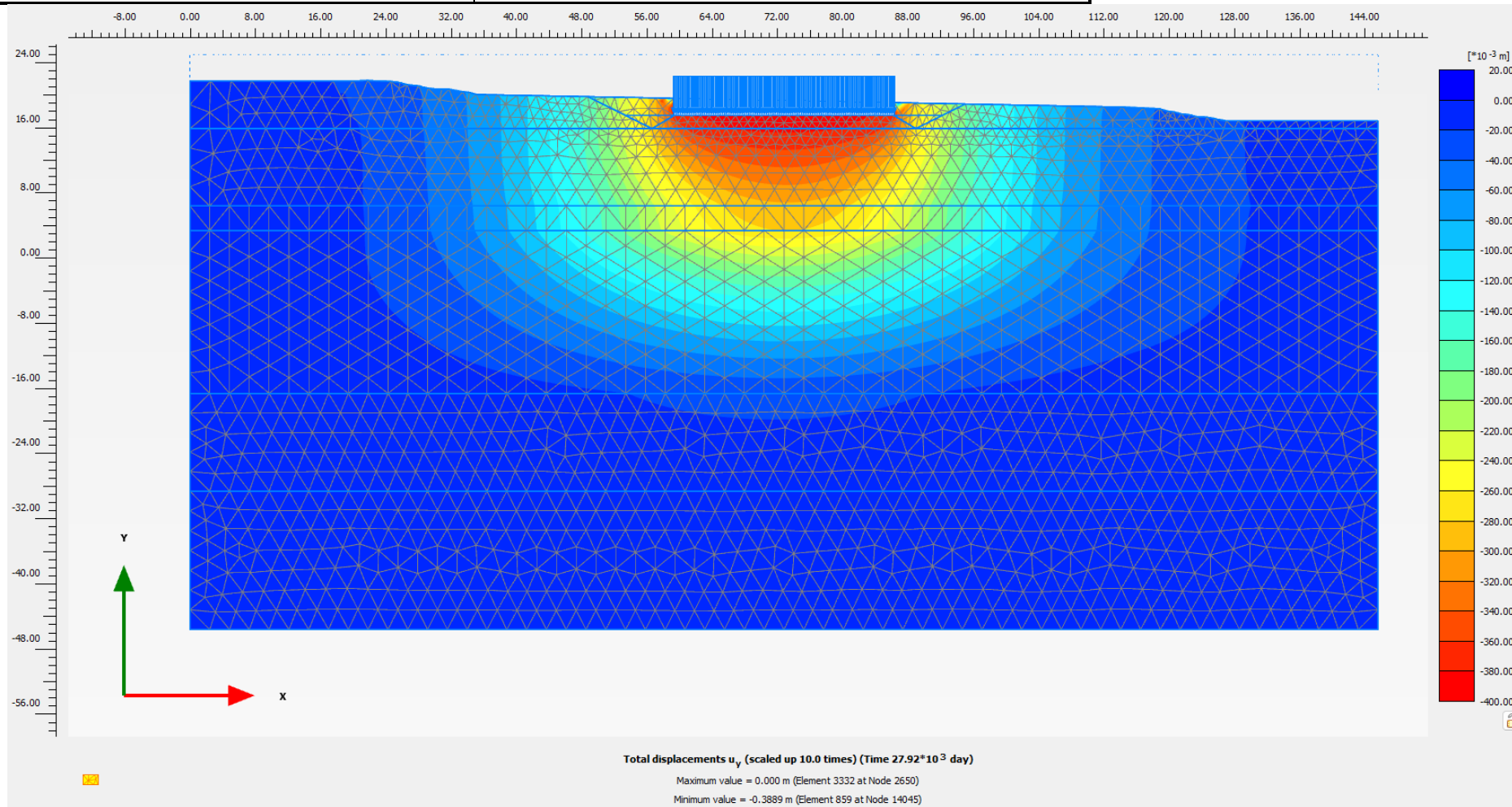


Figura 11.7: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi A – Spostamenti verticali a lungo termine

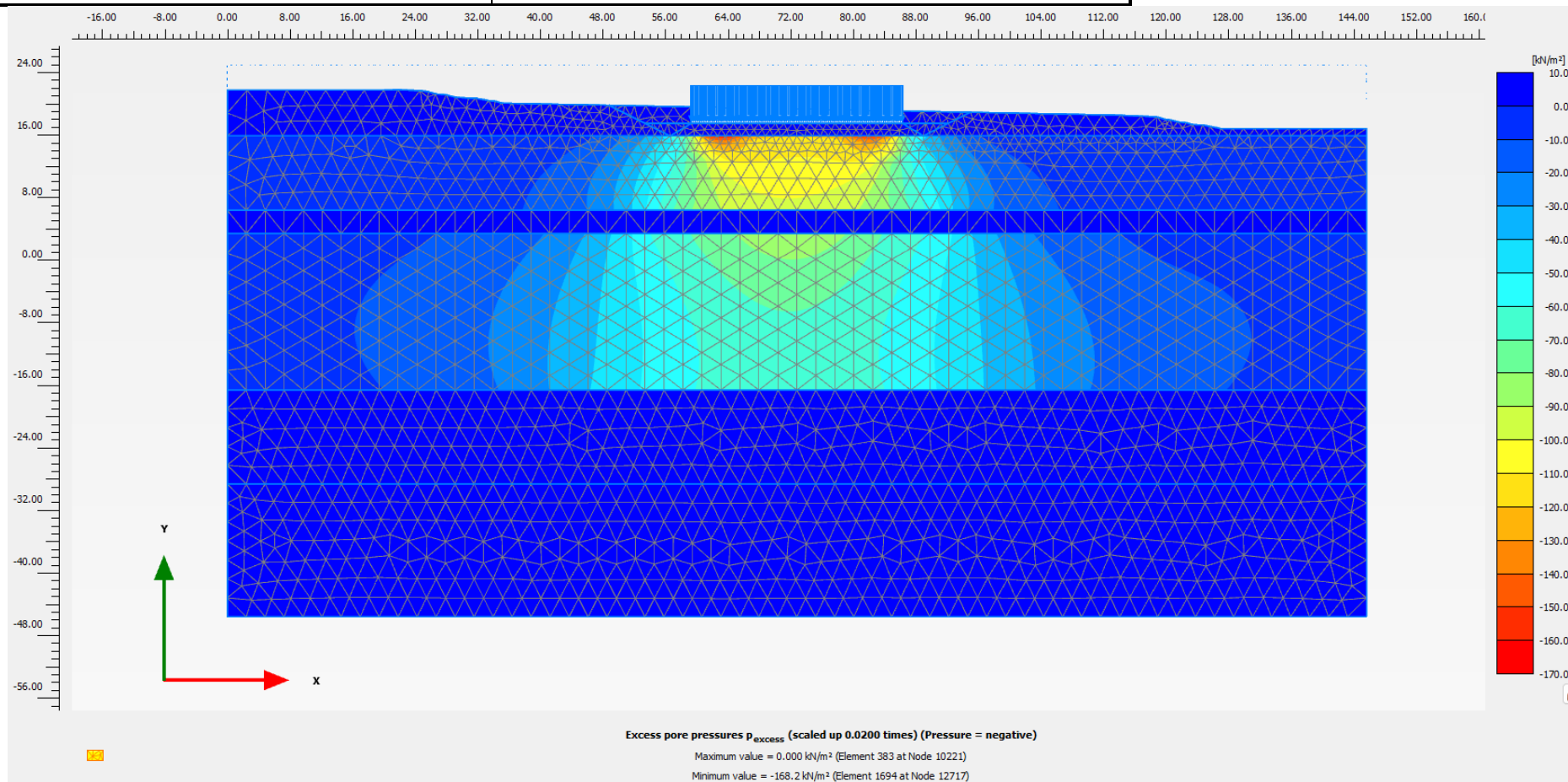


Figura 11.8: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi A – Sovrappressioni al termine della costruzione



PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2ª 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	12R09	RH	GE0006001	A	67 di 106

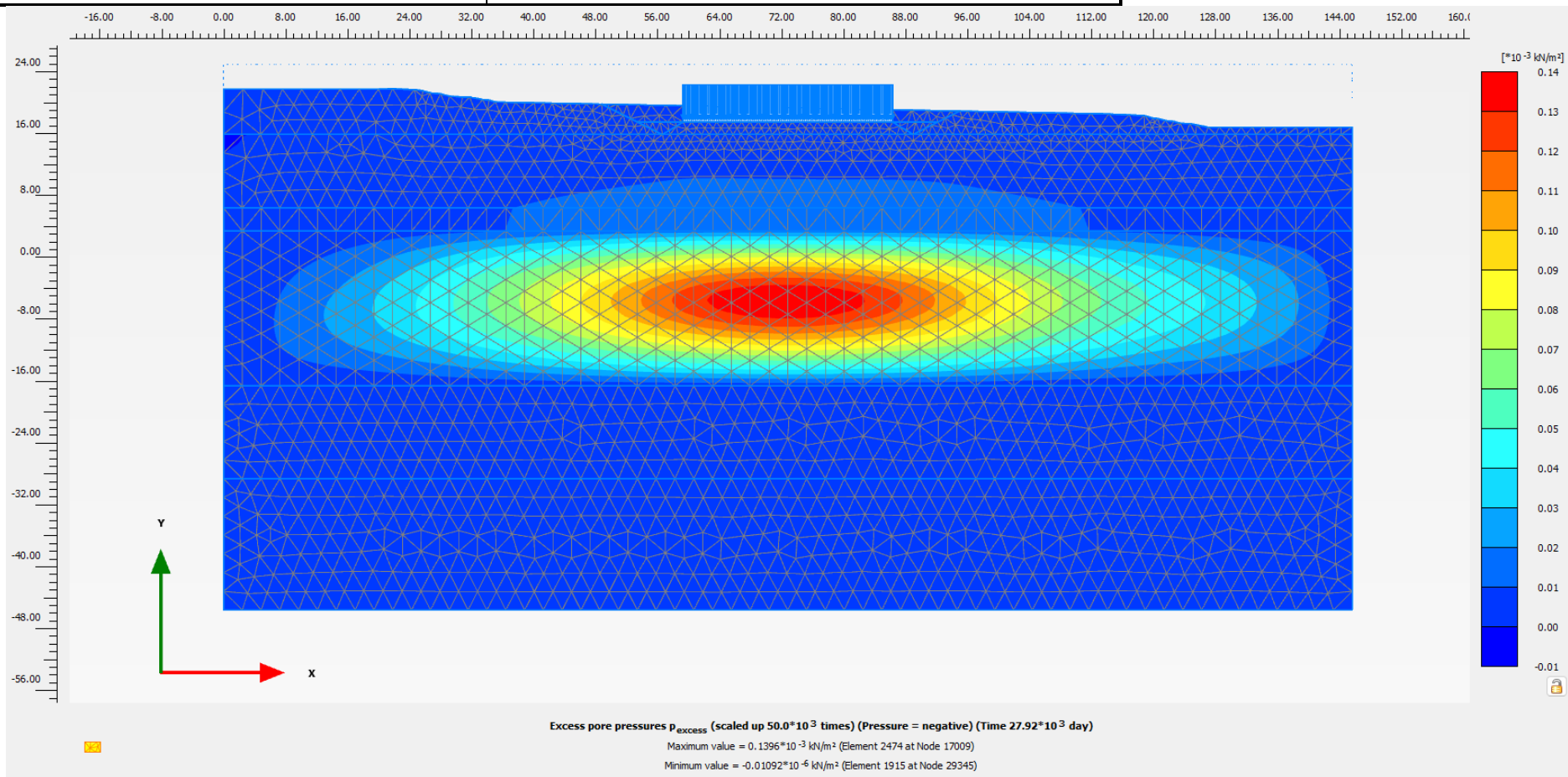


Figura 11.9: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi A – Sovrappressioni a lungo termine

11.3.5 Colonne deep mixing – Metodologia di installazione

Il trattamento in oggetto fa parte dei trattamenti colonnari che prevedono miscelazione profonda per mescolamento meccanico del terreno con miscele cementizie. Solitamente è identificato con il termine deep mixing oppure con gli acronimi DMM (Deep Mixing Method) o DCM (Deep Cement Mixing).

La tecnica del deep mixing risulta essere efficace ai fini di ridurre i cedimenti; l'adozione di tale tecnica è limitata principalmente dalla necessità di operare con attrezzature di notevole ingombro che ne impediscono di fatto l'utilizzo per interventi in sottofondazione, in zone urbane o in siti di difficile accesso. Si tratta di una particolare tecnica finalizzata a migliorare le caratteristiche meccaniche del terreno miscelando lo stesso insieme ad un legante e/o ad altri materiali che vengono introdotti in forma secca o in forma umida (boiaccia). Attualmente sono disponibili differenti metodi di miscelazione profonda, ognuno dei quali è conosciuto con un proprio nome in funzione di come viene iniettato il legante (metodo secco e metodo umido) e di come viene eseguita la miscelazione. Il getto avviene a media-bassa pressione (20-40 bar).

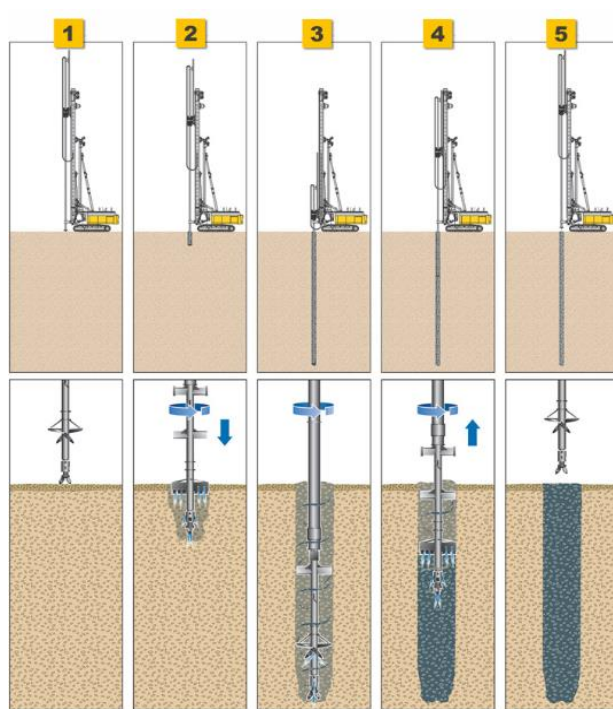



Figura 11.10: Schema di formazione colonne con la tecnica del deep mixing

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 69 di 106

11.3.6 Intervento di miglioramento con colonne deep mixing (Analisi B)


La soluzione con platea di fondazione su terreno migliorato tramite colonne deep mixing è stata modellata inizialmente tramite un modello 2D, mostrato in Figura 11.16, assumendo una soluzione con colonne deep mixing di diametro $D = 1000\text{mm}$ e lunghezza $L = 25\text{m}$ poste a interasse $i = 2.5\text{m}$ e strato ripartitore in materiale granulare compattato, di spessore 1.6m , interposto tra la testa delle colonne e l'intradosso della soletta. In prima istanza, l'intervento di miglioramento è stato simulato tramite un cluster esteso al volume di terreno interessato dal trattamento, al quale è stata assegnata una rigidezza equivalente rappresentativa del terreno trattato. Il valore della rigidezza equivalente è stato calibrato tramite modelli 2D assialsimmetrici di una cella elementare di trattamento, comprendente una singola colonna di trattamento e il volume di terreno circostante compreso nell'area di influenza della colonna stessa (Figura 11.11). Per il materiale granulare compattato dello strato di ripartizione è stato impiegato il modello elasto-plastico con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb con parametri $E = 40\text{MPa}$, $\phi' = 35^\circ$ e $c' = 0$. Sono state effettuate analisi parametriche variando la rigidezza della colonna deep mixing entro un range di valori tipici riportati in letteratura; per ciascun caso è stata applicata sul bordo superiore del modello una pressione uniforme pari a 100kPa , valutando la rigidezza equivalente del terreno trattato tramite le relazioni:

$$E = 0.83 * M = \frac{q}{\varepsilon_v}$$

$$\varepsilon_v = \frac{u_{y,top} - u_{y,bottom}}{L_t}$$

Dove q è il carico applicato, $u_{y,top}$ è lo spostamento medio del terreno a testa colonna, $u_{y,bottom}$ è lo spostamento medio del terreno a base colonna e L_t è la lunghezza delle colonne di trattamento.

In Figura 11.12 si riportano i *contours* dei cedimenti valutati dal modello assialsimmetrico nella colonna di terreno trattato e nel terreno circostante relativo al caso con $E_{col} = 125\text{MPa}$; in Figura 11.13 si riporta la distribuzione delle tensioni principali valutata dallo stesso modello, che evidenzia la ripartizione dei carichi applicati in fondazione tra colonna di terreno trattato e terreno circostante. In Tabella 11.8 è riportata una sintesi dei casi analizzati e relativi risultati in termini di modulo equivalente del terreno trattato. Sulla base di tali risultati si è assunto un valore rappresentativo della rigidezza equivalente del terreno trattato pari a 20MPa , corrispondente a un modulo di Young della colonna deep mixing pari a 125MPa .

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 70 di 106

La stratigrafia adottata nell'analisi è riportata in Tabella 11.1. I modelli costitutivi adottati per i terreni e per i materiali strutturali e i relativi parametri sono riportati nel paragrafo 11.3.2. Per il terreno trattato sono state adottate le stesse proprietà dei terreni naturali in termini di peso dell'unità di volume, resistenza e permeabilità, variando solo la rigidità come descritto sopra. Le fasi di calcolo analizzate sono descritte nel paragrafo 11.3.3.

In Figura 11.14 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 del rilevato 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 11.15 è riportato lo spostamento verticale u_y lungo una sezione orizzontale in corrispondenza dell'intradosso dello scatolare al termine delle stesse fasi di calcolo.

I risultati sono mostrati nelle figure seguenti. In particolare, in Figura 11.17, Figura 11.18, Figura 11.19 e Figura 11.20 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. Dall'analisi risulta un cedimento massimo a lungo termine di circa 22 cm che, seppur dimezzato rispetto all'analisi senza alcun trattamento, supera ancora abbondantemente il valore ammissibile. Risulta pertanto necessario considerare un trattamento con inclusioni rigide, descritto nei successivi paragrafi.

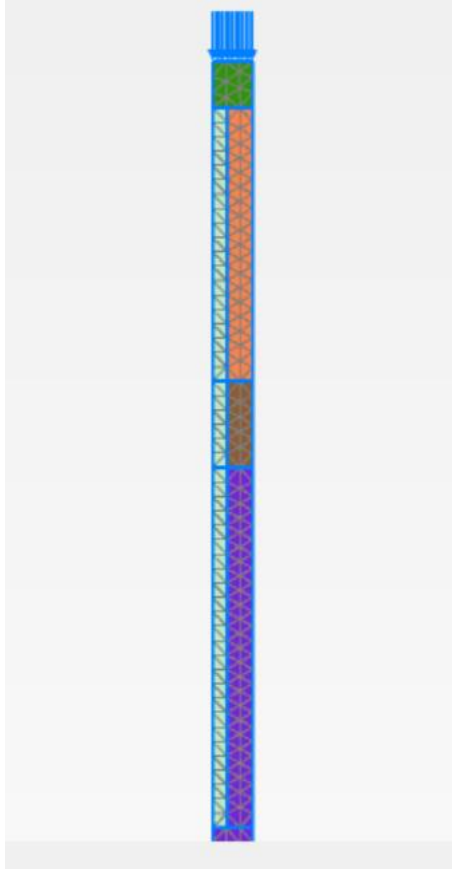


Figura 11.11: Modello assialsimmetrico di una cella elementare comprendente colonna deep mixing e terreno circostante

RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI

COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 72 di 106
------------------	----------------	----------------	------------------------	-----------	---------------------

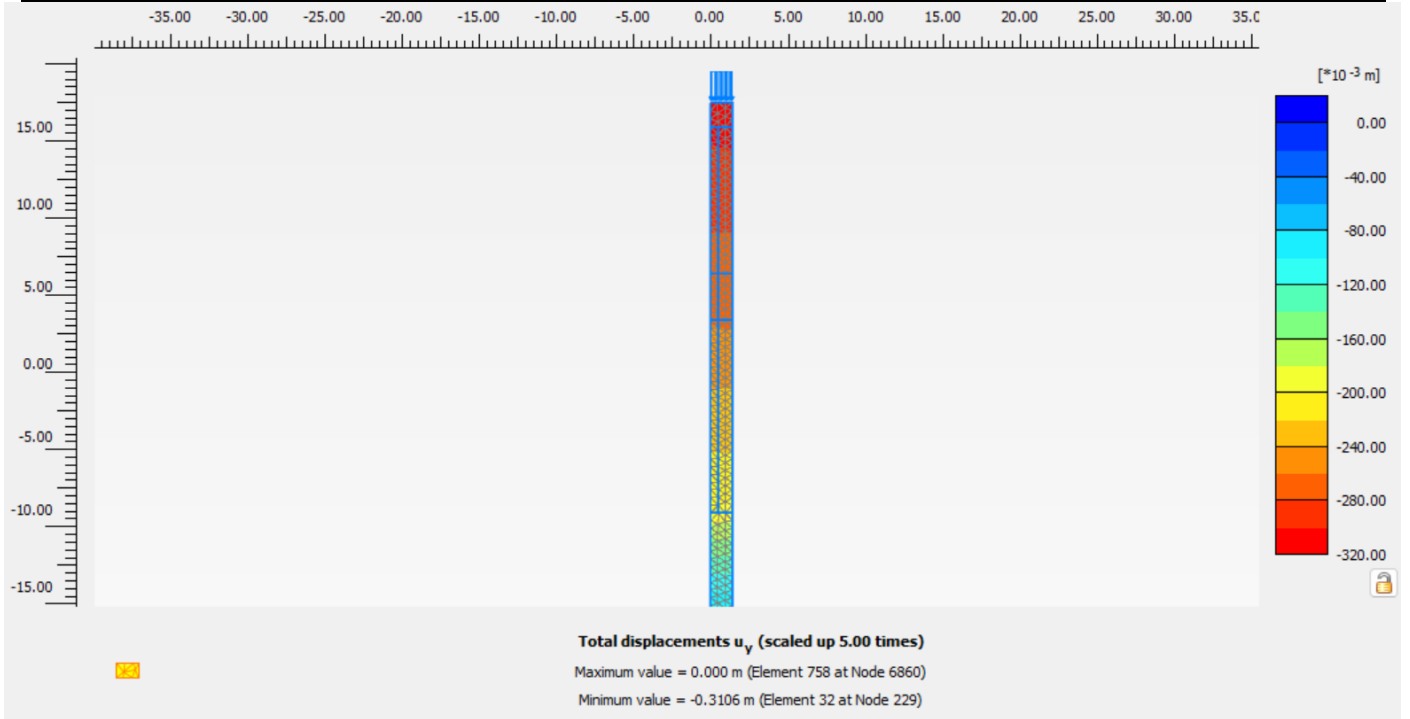


Figura 11.12: Cedimenti valutati dal modello assialsimmetrico di cella elementare con modulo di Young della colonna deep mixing pari a 125MPa

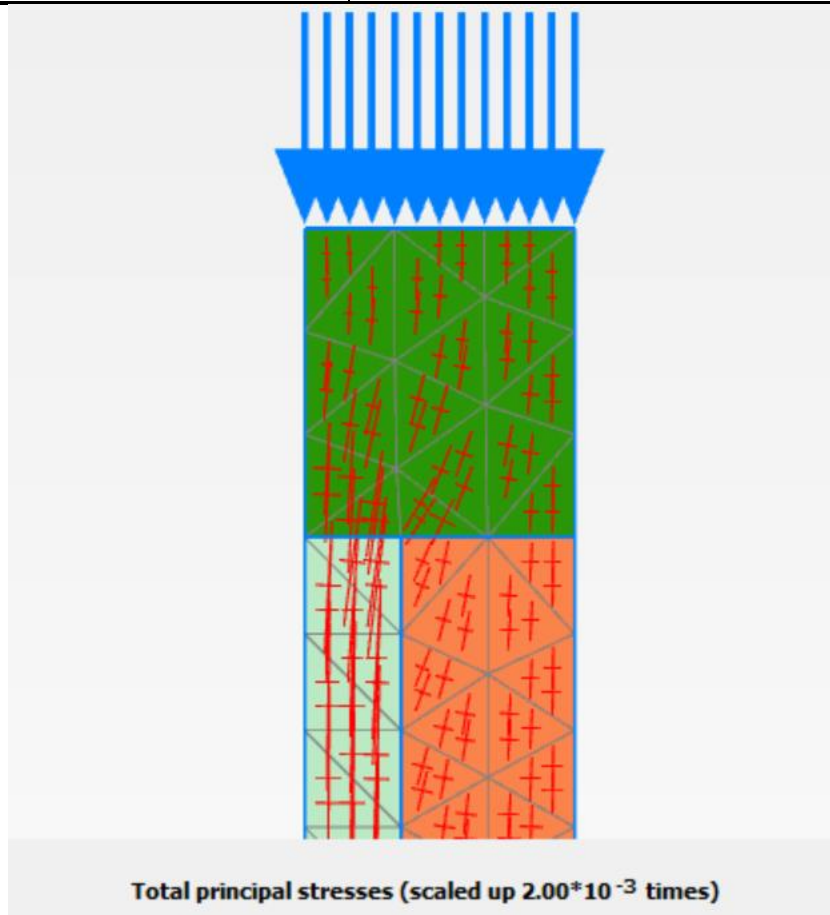


Figura 11.13: Distribuzione delle tensioni principali valutate dal modello assialsimmetrico di cella elementare con modulo di Young della colonna deep mixing pari a 125MPa

Tabella 11.8: Sintesi delle analisi effettuate su modelli assialsimmetrici di cella elementare di deep mixing

Modulo di Young della colonna deep mixing, E_{col} [MPa]	Spostamento medio del terreno a testa colonna, $u_{y,top}$ [m]	Spostamento medio del terreno a base colonna, $u_{y,bottom}$ [mm]	Deformazione media verticale del terreno trattato, ϵ_v [-]	Modulo di Young equivalente del terreno trattato, E_{eq} [MPa]
25	0.46	0.19	0.011	9.4
50	0.39	0.19	0.008	12.6
100	0.33	0.19	0.006	17.9
125	0.31	0.19	0.005	20.2

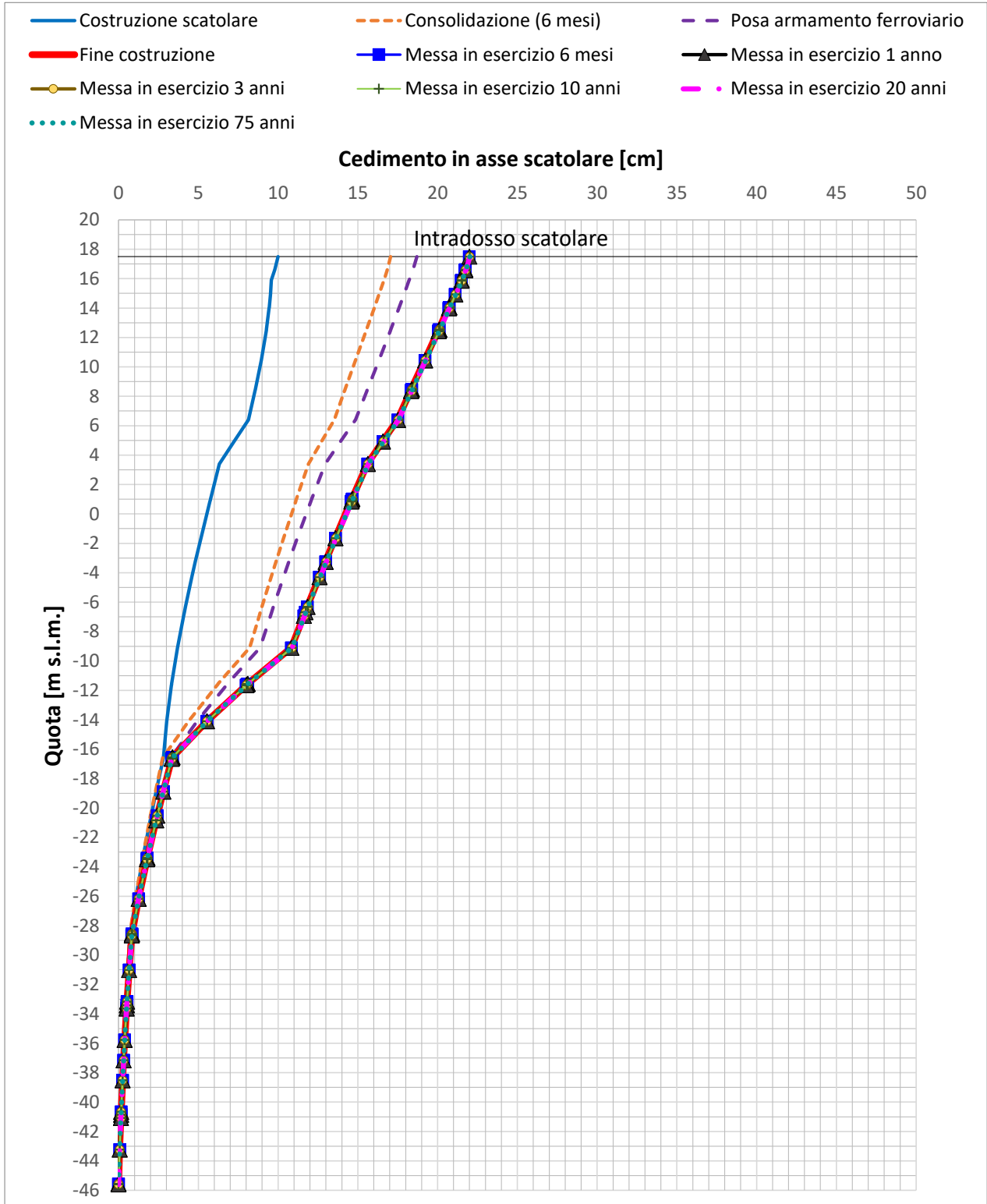


Figura 11.14: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi B – Spostamenti verticali in corrispondenza dell'asse dello scatolare

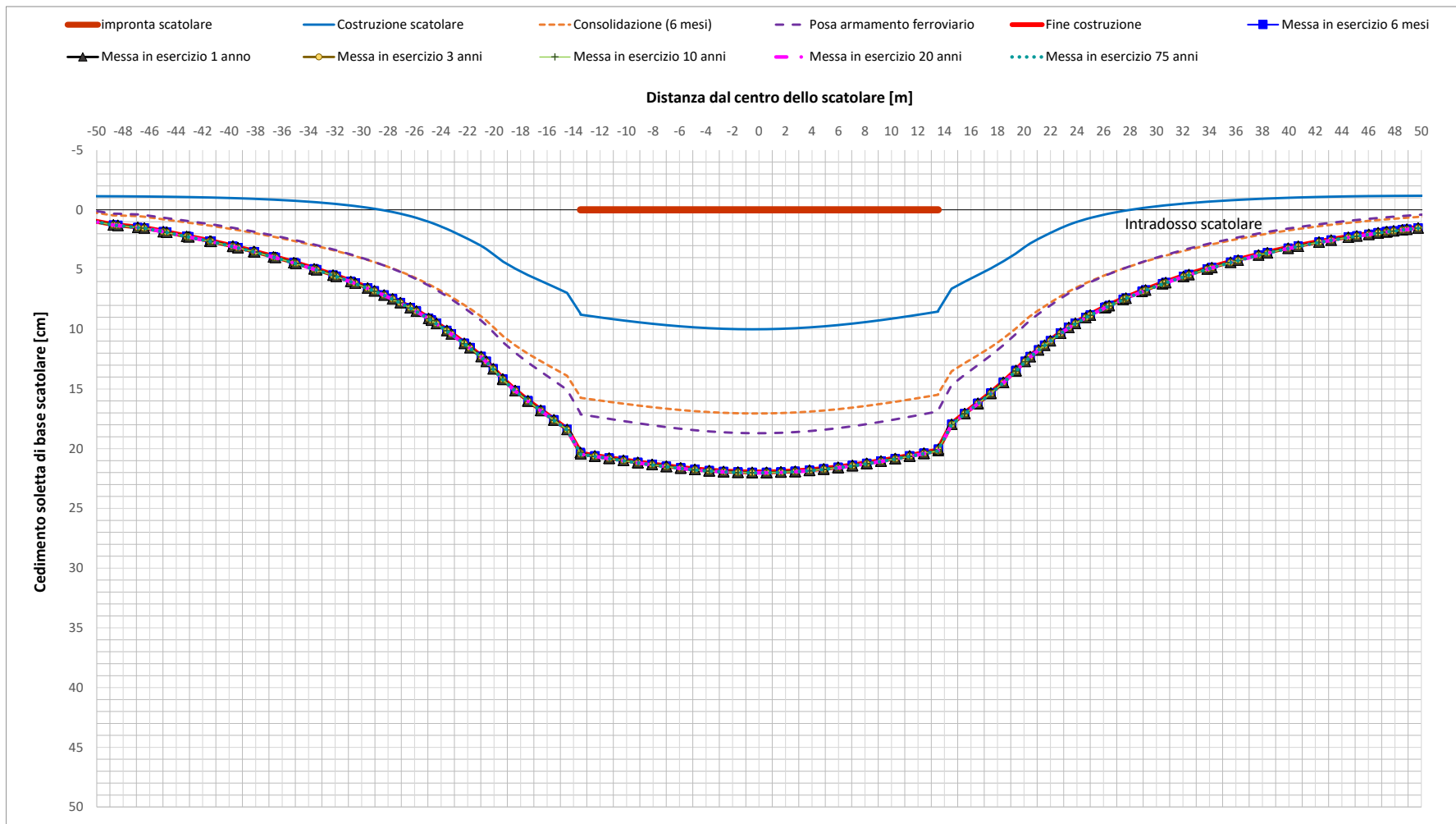


Figura 11.15: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi B – Profilo trasversale degli spostamenti verticali lungo lo scatolare

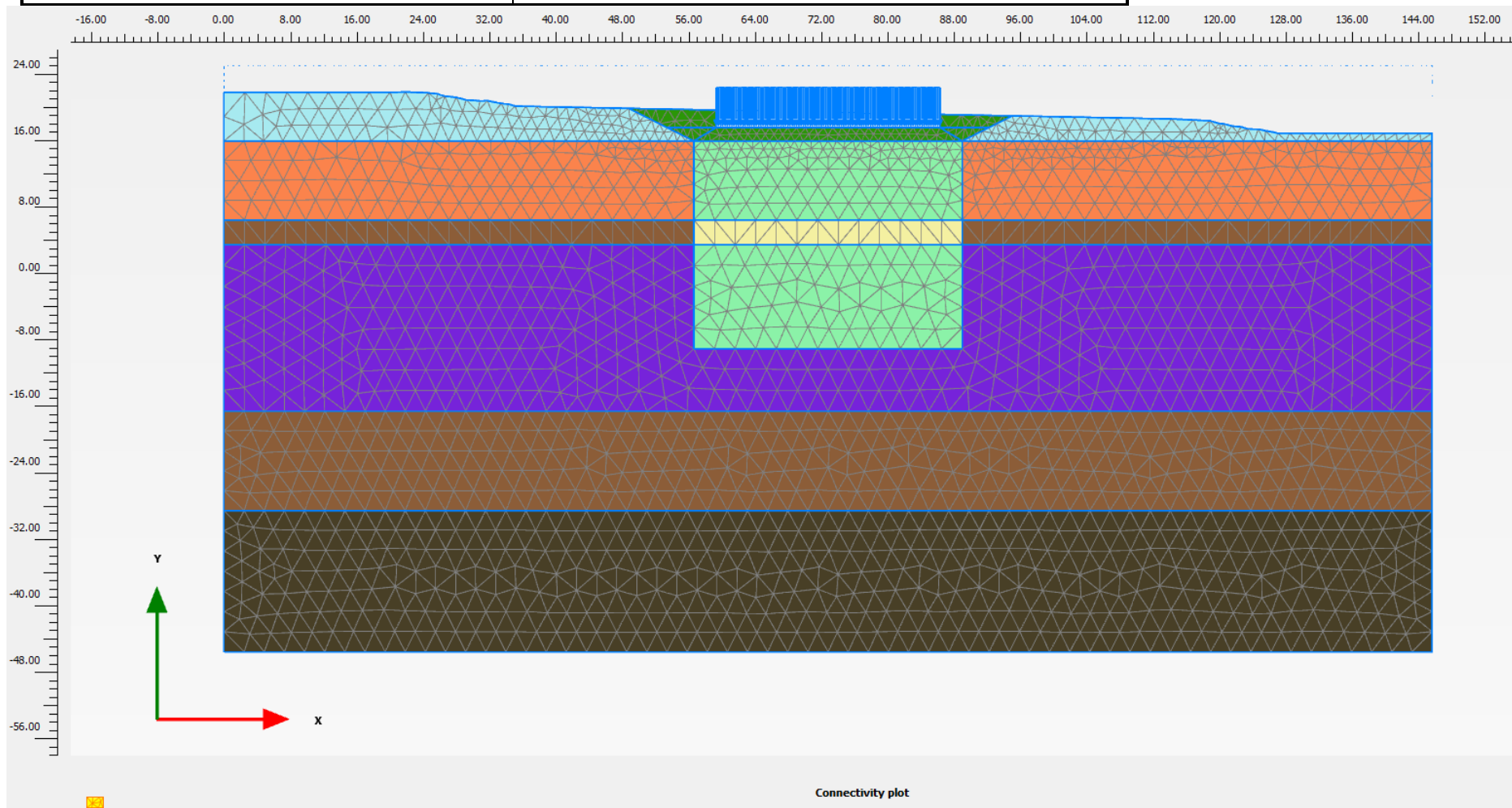


Figura 11.16: Modello Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi B

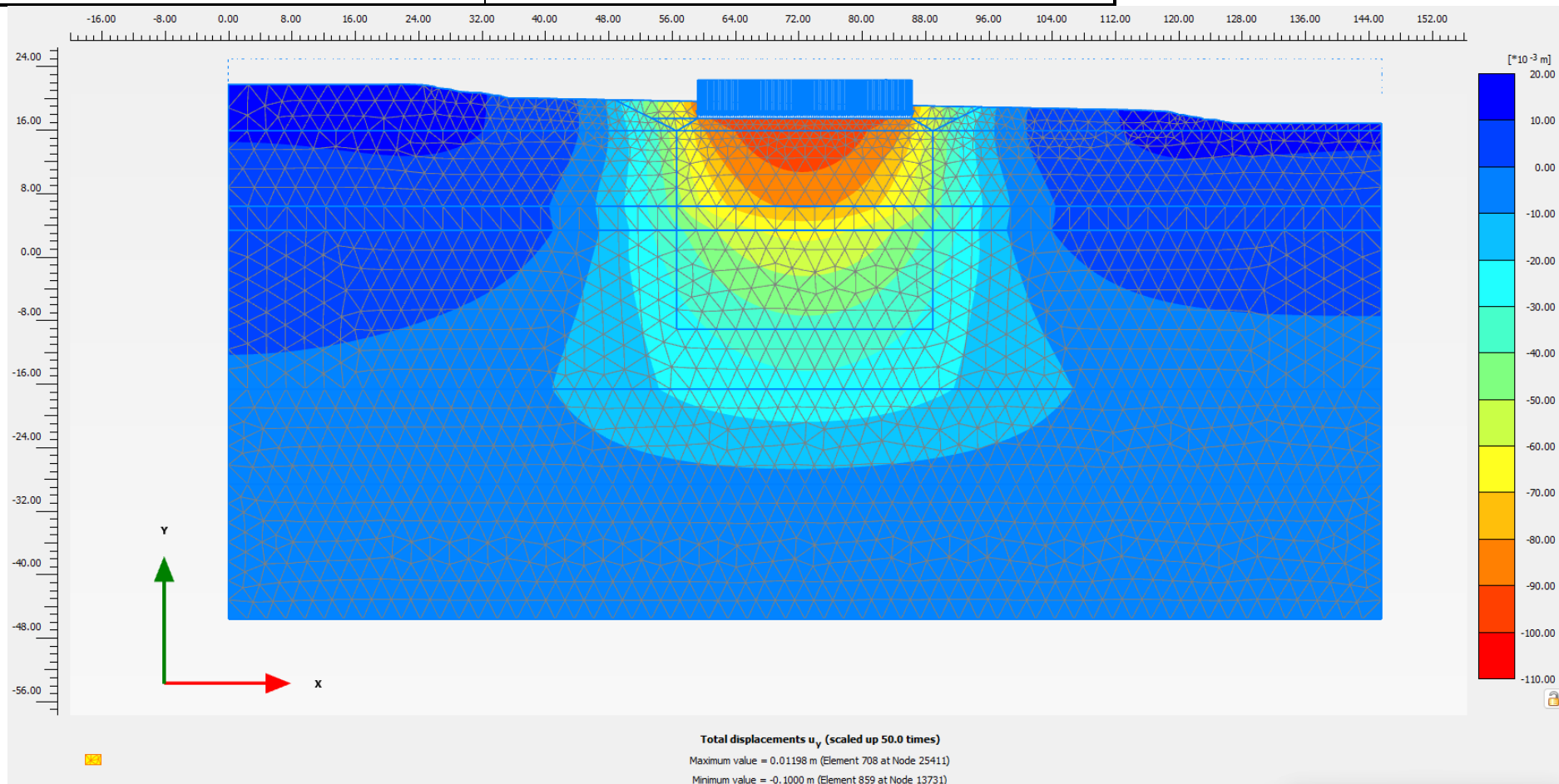


Figura 11.17: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi B – Spostamenti verticali al termine della costruzione

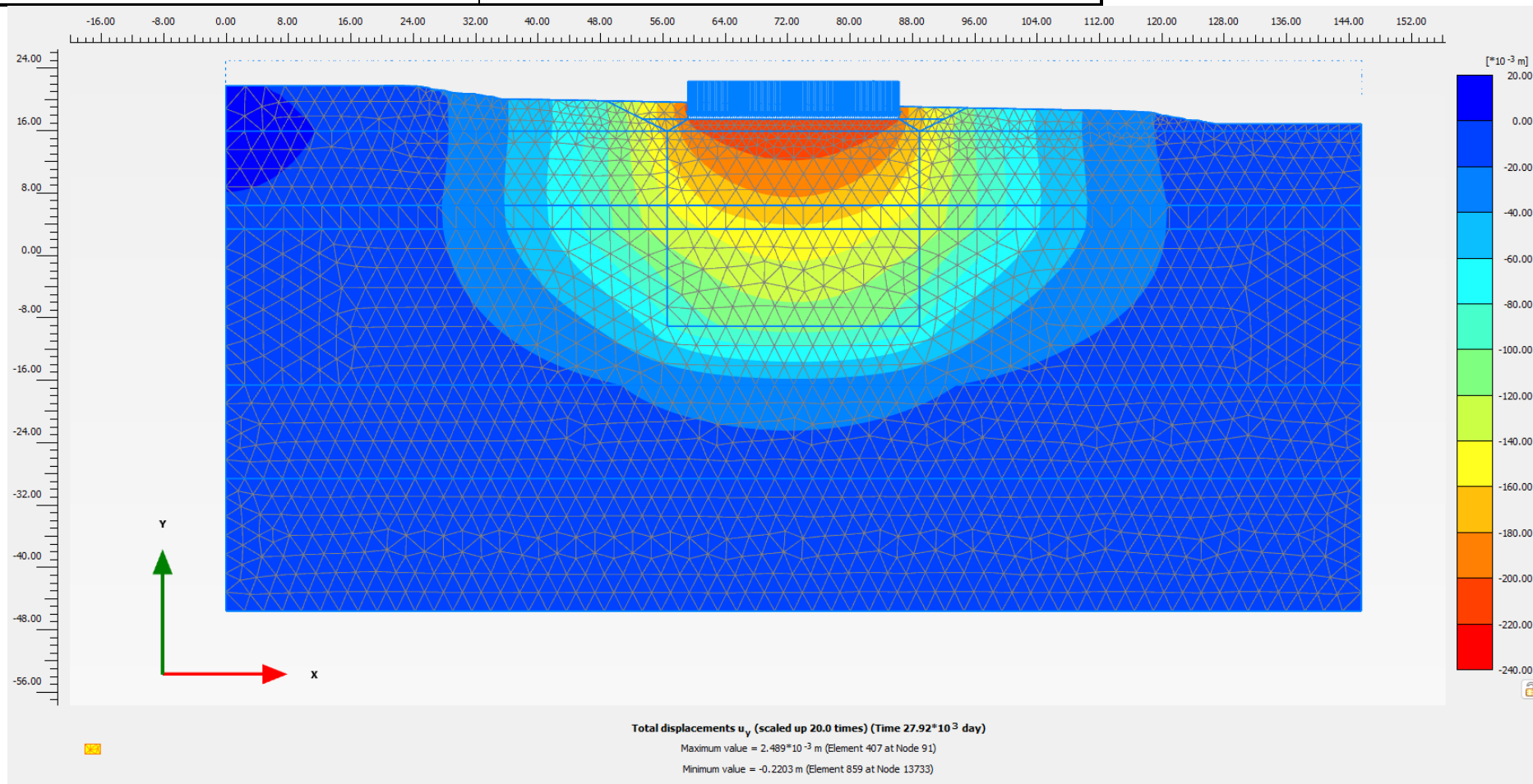


Figura 11.18: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi B – Spostamenti verticali a lungo termine

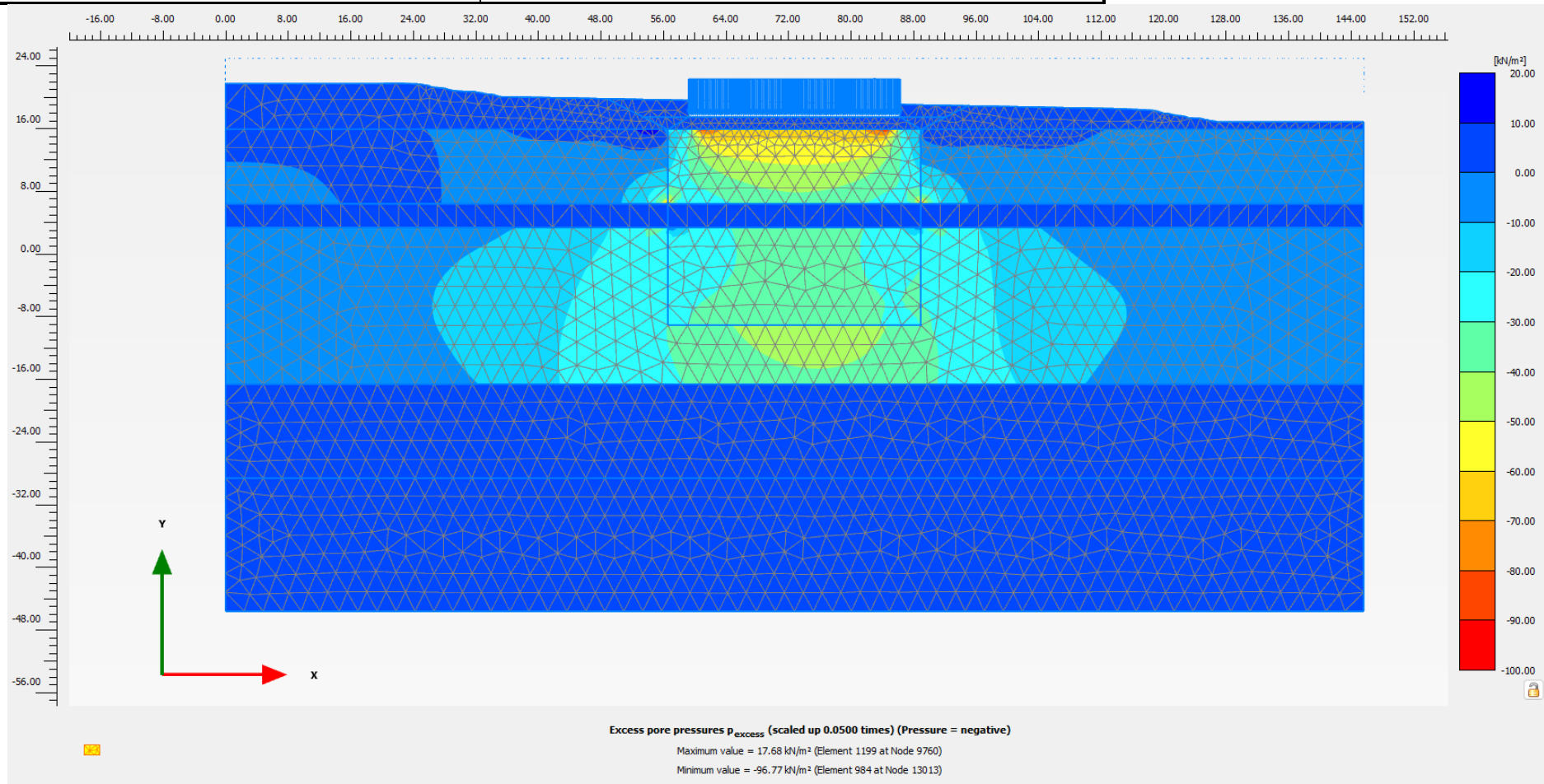


Figura 11.19: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi B – Sovrappressioni al termine della costruzione

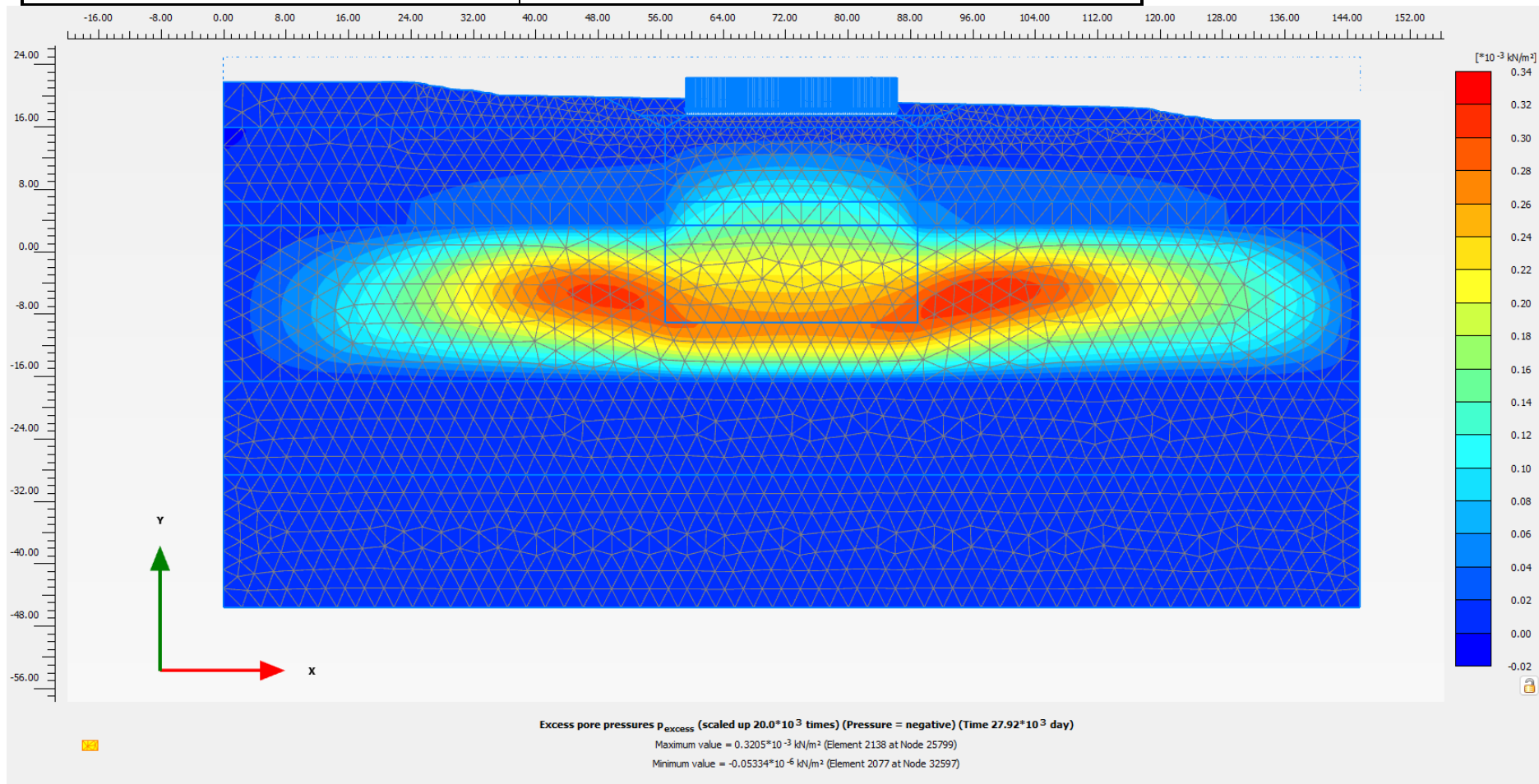



Figura 11.20: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi B – Sovrappressioni a lungo termine

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 81 di 106

11.3.7 Inclusioni rigide – Metodologia di installazione


Il trattamento del terreno con inclusioni rigide prevede l'installazione di pali non armati con funzione di riduttori dei cedimenti attesi. Per il caso in esame si considerano pali non collegati strutturalmente alla soletta di fondazione; si considerano pali a elica continua (CFA) per lunghezze fino a 25m e pali trivellati per lunghezze superiori. Dato lo spessore della soletta di fondazione (1.2m), che la rende adatta a svolgere la funzione di ripartizione dei carichi applicati a estradosso fondazione, non è prevista per il caso in esame l'installazione di uno strato ripartitore in materiale granulare compattato interposto tra la testa dei pali e l'intradosso della soletta. Come dettagliato nel paragrafo 11.3.9, la soluzione prescelta per il caso in esame prevede pali di lunghezza $L = 38m$, che dovranno essere quindi necessariamente pali trivellati di grande diametro.

11.3.8 Intervento di miglioramento con inclusioni rigide – Pali intestati nell'unità geotecnica AL1 (Analisi C)

Dal momento che, come dettagliato nel paragrafo 11.3.6, l'intervento di miglioramento con colonne deep mixing non consente di limitare i cedimenti ai valori ammissibili, si è considerato un intervento di miglioramento con inclusioni rigide. La metodologia esecutiva di tale intervento è descritta brevemente nel paragrafo 11.3.7.

In prima istanza, si sono considerate inclusioni rigide di diametro $D = 800mm$ e lunghezza $L = 25m$, compatibile con le limitazioni tecnologiche di pali a elica continua (CFA). L'intervento è stato modellato tramite un'analisi 3D in cui si è implementata una striscia elementare di larghezza pari all'interasse tra le inclusioni rigide, assunto pari a 2.4m (Figura 11.23). Le inclusioni rigide sono state modellate esplicitamente con elementi di volume; l'interazione con il terreno circostante è stata modellata attraverso appositi elementi interfaccia, a cui sono stati assegnati parametri di resistenza atti a simulare le tensioni tangenziali ultime all'interfaccia tra pali e terreno. Tale modellazione è stata scelta in quanto consente di simulare in maniera realistica il trasferimento del carico applicato sulla platea di fondazione alle inclusioni rigide e al terreno circostante, in funzione della loro rigidità relativa.

La stratigrafia adottata nell'analisi è riportata in Tabella 11.1. I modelli costitutivi adottati per i terreni e per i materiali strutturali e i relativi parametri sono riportati nel paragrafo 11.3.2. L'analisi è condotta in condizioni drenate per ottenere una stima dei cedimenti a lungo termine dovuti all'applicazione del carico complessivo dovuto ai pesi propri strutturali e non strutturali.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 82 di 106

In Figura 11.21 è riportato lo spostamento verticale u_y lungo una sezione verticale in corrispondenza dell'asse dello scatolare, valutato a lungo termine. In Figura 11.22 è riportato lo spostamento verticale u_y lungo una sezione orizzontale in corrispondenza dell'intradosso dello scatolare, valutato a lungo termine.

Nella Figura 11.24 sono riportati i *contours* dei cedimenti totali a lungo termine valutati dall'analisi; il cedimento massimo a lungo termine risulta pari a circa 12 cm. Esaminando i risultati dell'analisi è possibile fare le seguenti considerazioni:

- L'entità dei carichi applicati a estradosso fondazione è tale da produrre significativi incrementi tensionali alla base delle colonne di trattamento;
- A seguito degli incrementi tensionali di cui sopra, che interessano argille normalconsolidate con compressibilità elevata, insorge un meccanismo deformativo globale con cedimenti significativi del terreno non trattato; ciò induce attrito negativo sugli elementi di trattamento riducendone l'efficacia in termini di riduzione dei cedimenti attesi.

Pertanto, sulla base delle considerazioni espresse sopra si può concludere che l'intervento di miglioramento con inclusioni rigide di diametro $D = 800\text{mm}$ e lunghezza $L = 25\text{m}$ poste a interasse $i = 2.4\text{m}$ non è sufficiente al fine di ridurre i cedimenti entro i valori ammissibili. I risultati dell'analisi indicano chiaramente che nel caso in esame il fattore condizionante l'efficacia del trattamento è la lunghezza dei pali; pertanto, si è ritenuto che aumentare la densità del trattamento considerando pali di diametro maggiore e/o riducendo l'interasse tra i pali non porterebbe a un miglioramento sostanziale dell'efficacia del trattamento. Nell'iterazione successiva si è quindi presa in considerazione una soluzione con pali intestati nell'unità geotecnica SL, descritta nel paragrafo 11.3.9.

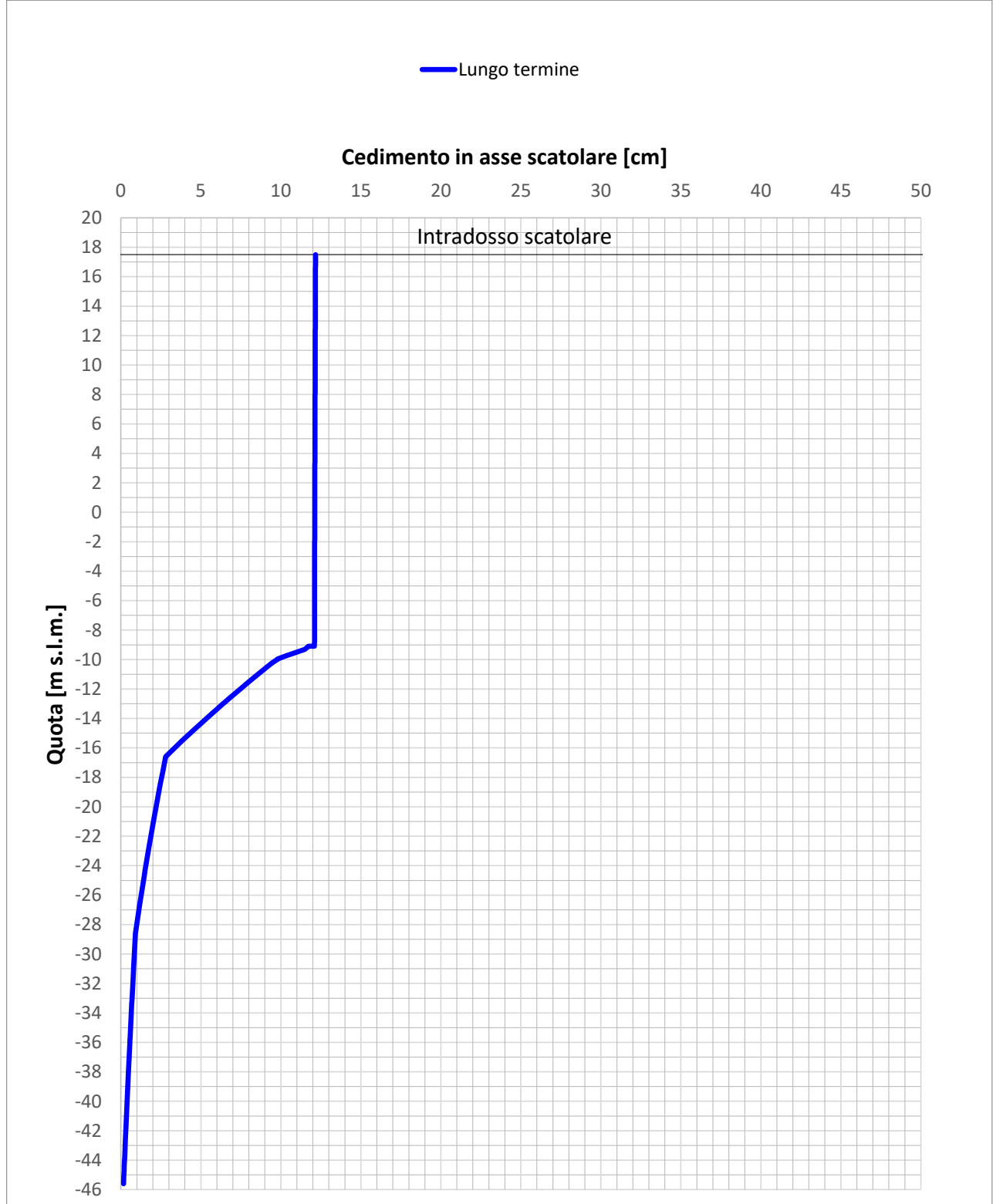


Figura 11.21: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi C – Spostamenti verticali in corrispondenza dell'asse dello scatolare

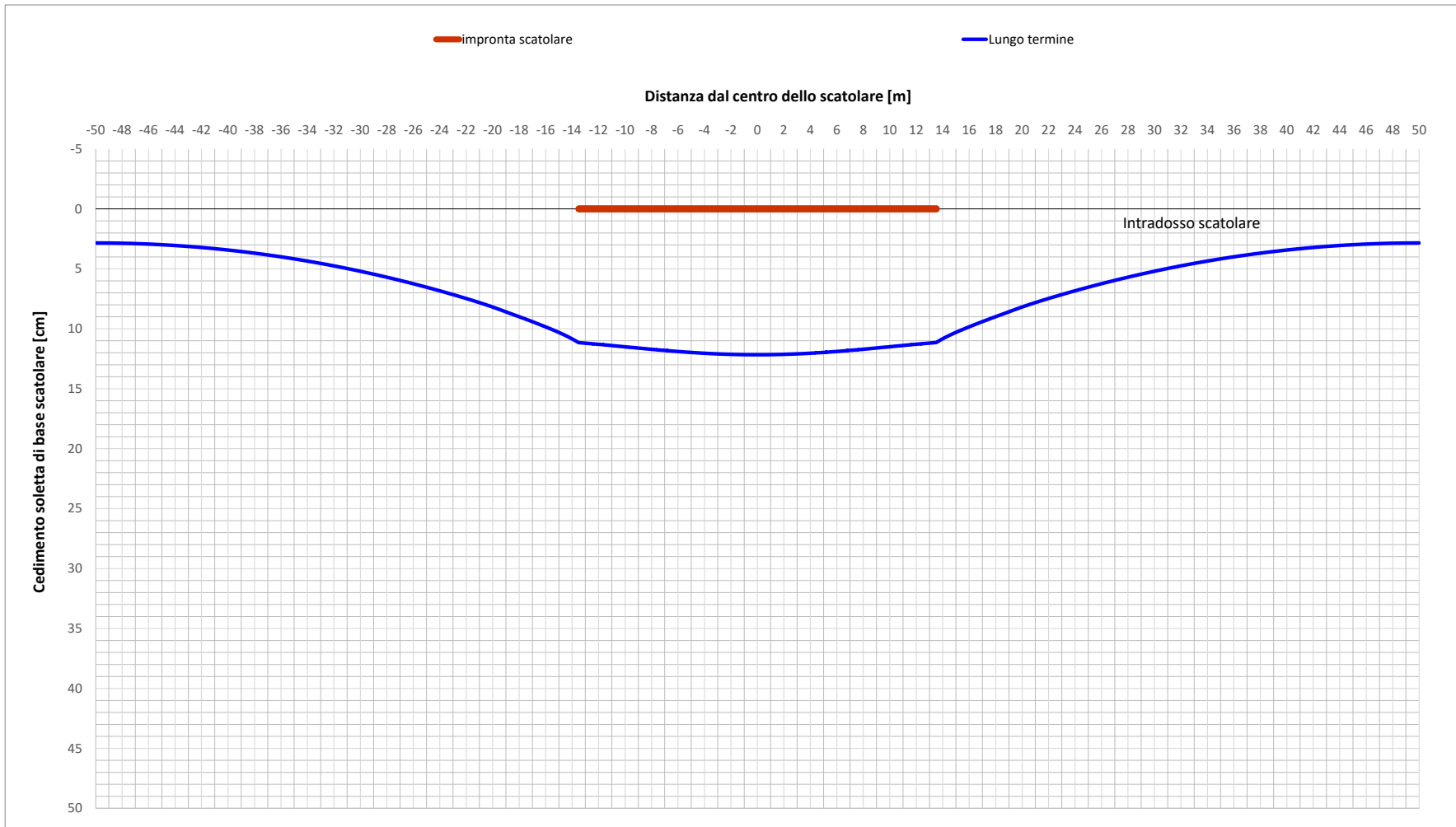


Figura 11.22: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi C – Profilo trasversale degli spostamenti verticali lungo lo scatolare

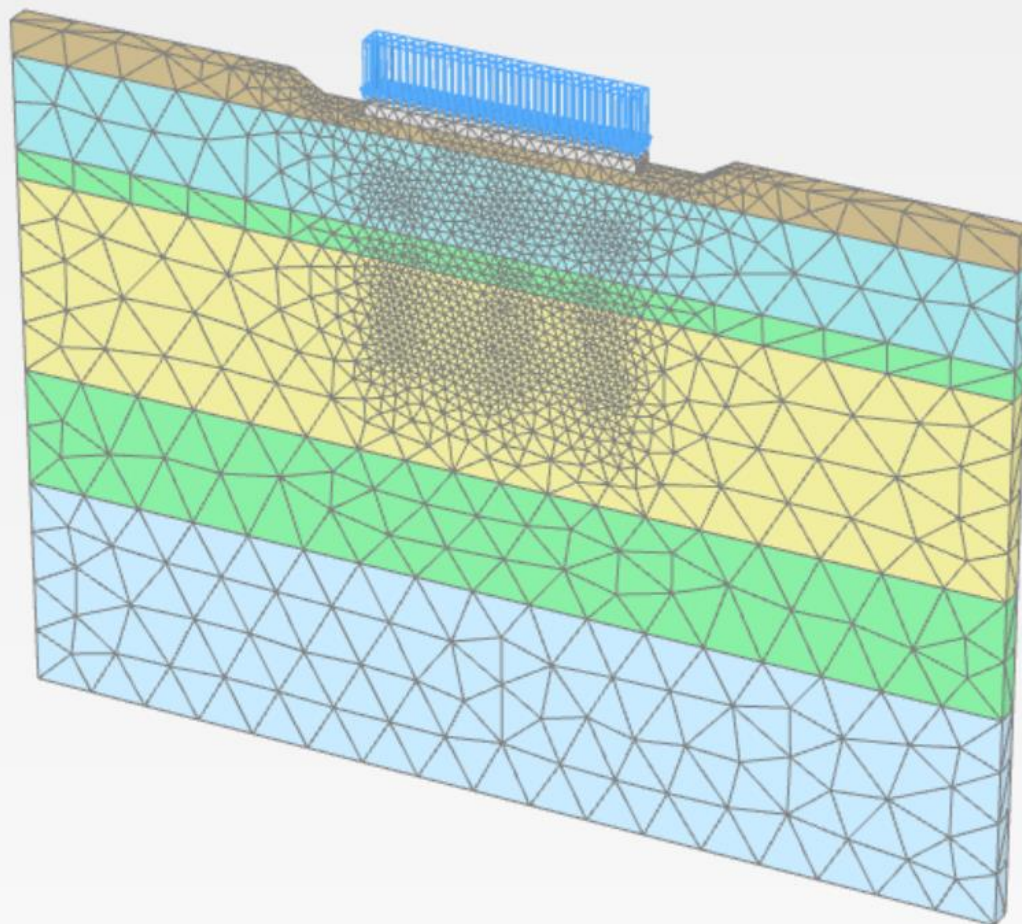
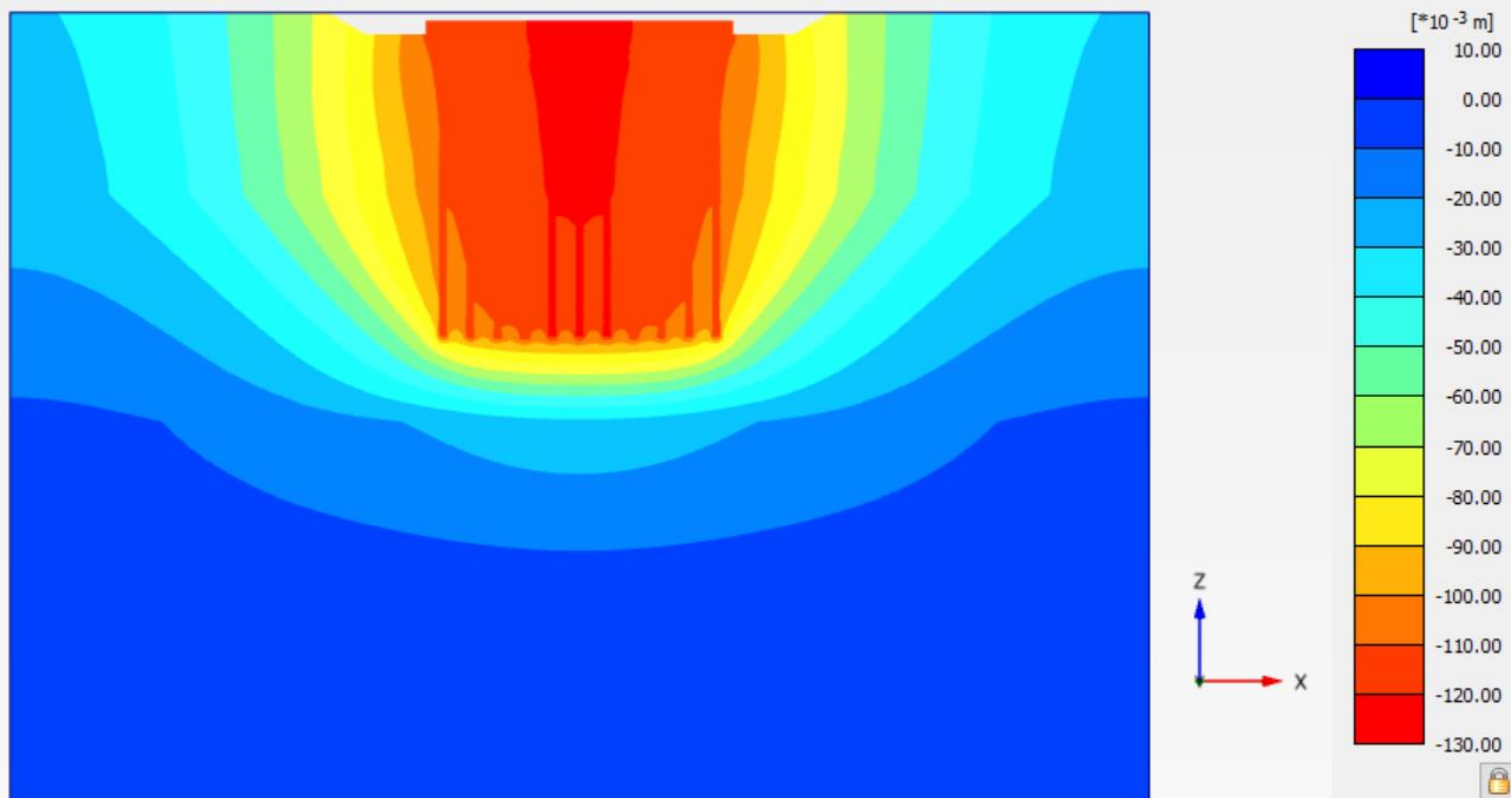


Figura 11.23: Modello Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi C




Total displacements u_z (scaled up 20.0 times)

Maximum value = 0.000 m

Minimum value = -0.1217 m

Figura 11.24: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi C – Spostamenti verticali a 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 NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 87 di 106


11.3.9 Intervento di miglioramento con inclusioni rigide – Pali intestati nell'unità geotecnica SL (Analisi D)

Dal momento che, come dettagliato nel paragrafo 11.3.8, l'intervento di miglioramento con inclusioni rigide intestate nelle argille non consente di limitare i cedimenti ai valori ammissibili, si è considerato un intervento con inclusioni rigide di lunghezza $L = 38\text{m}$, intestate nell'unità geotecnica SL per una lunghezza pari a circa $4D$. Dovendo realizzare pali di notevole lunghezza, necessariamente pali trivellati di grande diametro, si è considerata una soluzione con pali di diametro $D = 1000\text{mm}$ posti a interasse $i = 4\text{m}$. Al fine di valutare in maniera realistica le deformazioni della fondazione e dei pali e le conseguenti sollecitazioni il modello di calcolo è stato affinato rispetto all'Analisi C, introducendo la struttura dello scatolare modellata esplicitamente con elementi di volume (Figura 11.27); in tal modo è stato possibile tenere conto del contributo irrigidente della struttura. Dal momento che le pressioni applicate a intradosso fondazione includono il peso proprio dello scatolare, quest'ultimo è stato modellato solo in termini di rigidità, assegnando peso di volume nullo all'elemento corrispondente nel modello 3D.

La stratigrafia adottata nell'analisi è riportata in Tabella 11.1. I modelli costitutivi adottati per i terreni e per i materiali strutturali e i relativi parametri sono riportati nel paragrafo 11.3.2. Le fasi di calcolo analizzate sono descritte nel paragrafo 11.3.3.

In Figura 11.25 è riportato lo spostamento verticale u_z 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 del rilevato 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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 88 di 106

In Figura 11.26 è riportato lo spostamento verticale u_z lungo una sezione orizzontale in corrispondenza dell'intradosso dello scatolare al termine delle stesse fasi di calcolo.

Come mostrato in e Figura 11.28 e Figura 11.29, 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 11.30 e Figura 11.31).

I risultati sono mostrati nelle figure seguenti. In particolare, in Figura 11.28, Figura 11.29, Figura 11.30 e Figura 11.31 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.

Esaminando i risultati dell'analisi è possibile fare le seguenti considerazioni:

- Intestando i pali nello strato SL i carichi applicati in fondazione vengono trasmessi quasi interamente a questo strato attraverso i pali, con incrementi tensionali ridotti nello strato di argilla;
- I ridotti incrementi tensionali nello strato di argilla comportano una sostanziale riduzione dei cedimenti assoluti in fondazione (cedimento massimo dell'ordine di 4 cm).

Sulla base dei risultati sopracitati, si può concludere che l'intervento con pali intestati nelle sabbie risulta efficace nel limitare i cedimenti attesi ai valori ammissibili.

- Costruzione scatolare
- Consolidazione (6 mesi)
- Posa armamento ferroviario
- Fine costruzione
- Messa in esercizio 6 mesi
- Messa in esercizio 1 anno
- Messa in esercizio 3 anni
- Messa in esercizio 10 anni
- Messa in esercizio 20 anni
- Messa in esercizio 75 anni

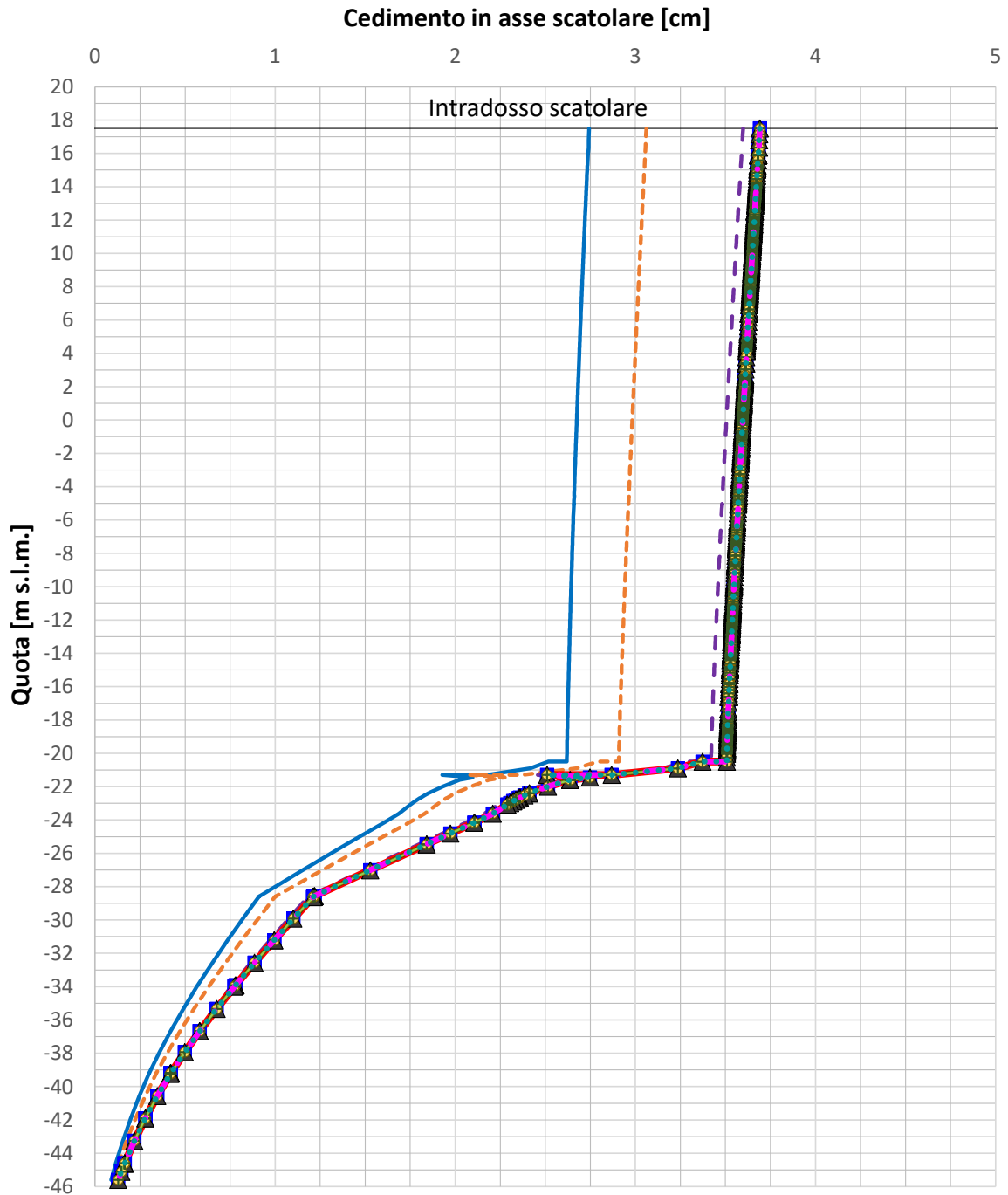


Figura 11.25: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi D – Spostamenti verticali in corrispondenza dell'asse dello scatolare

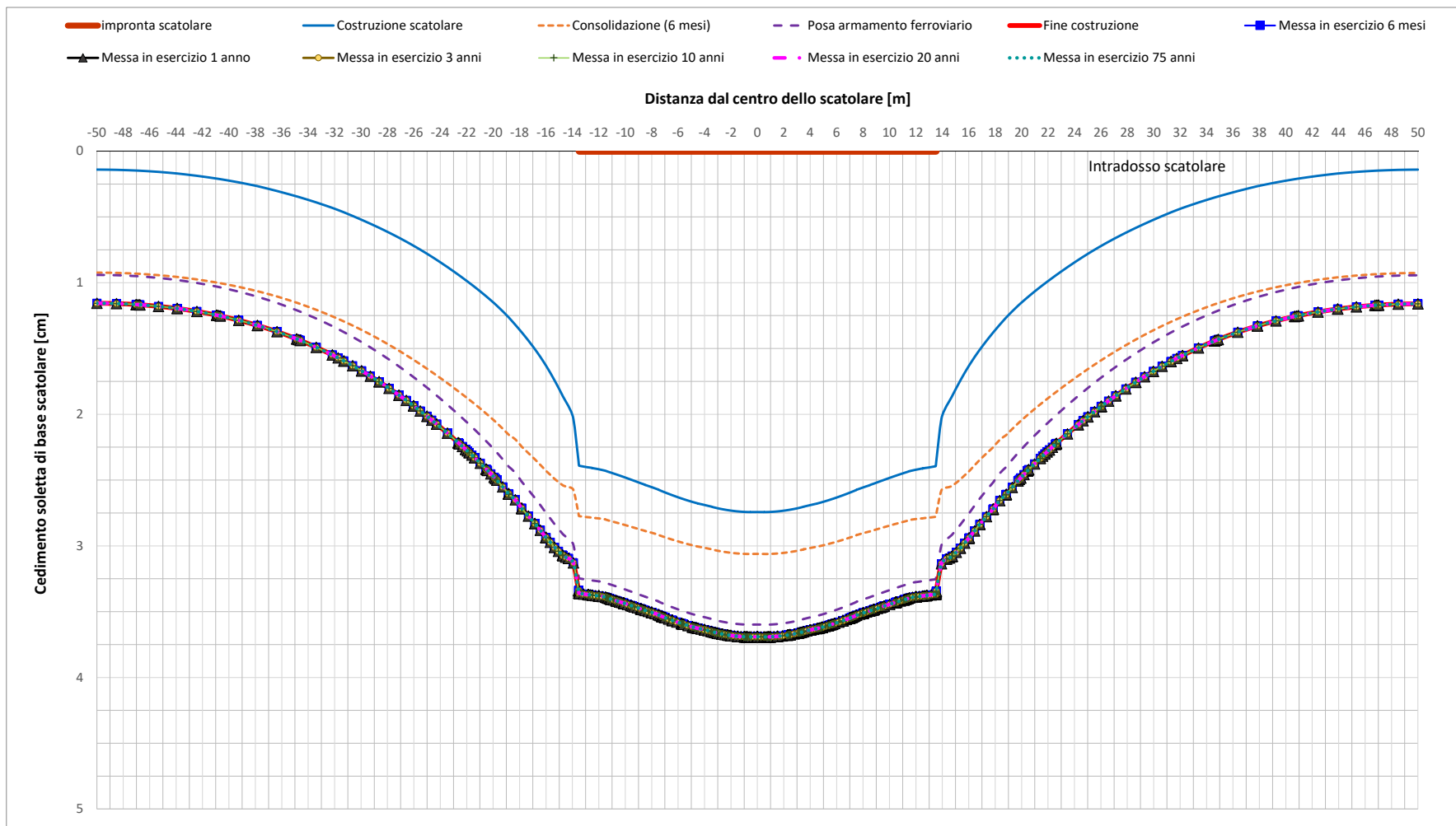


Figura 11.26: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi D – Profilo trasversale degli spostamenti verticali lungo lo scatolare

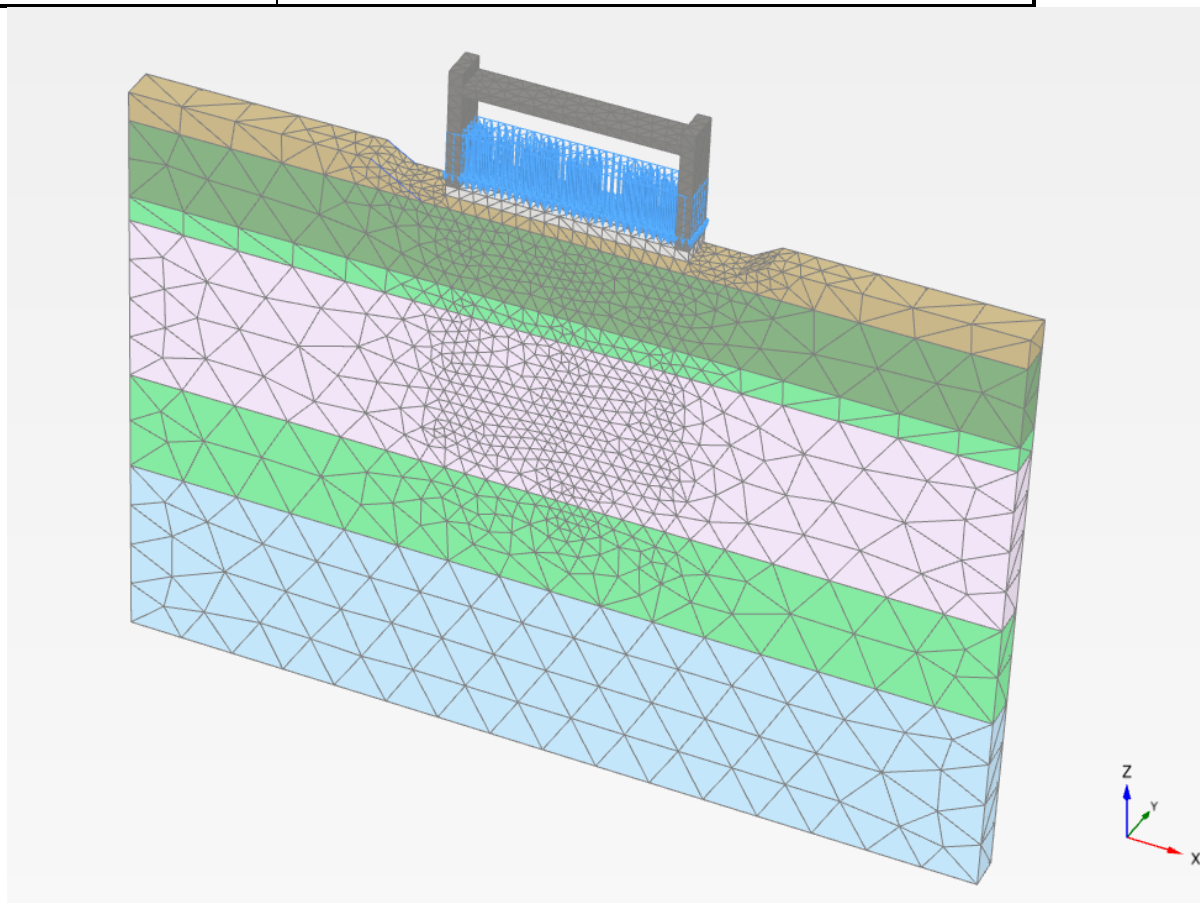


Figura 11.27: Modello Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi D

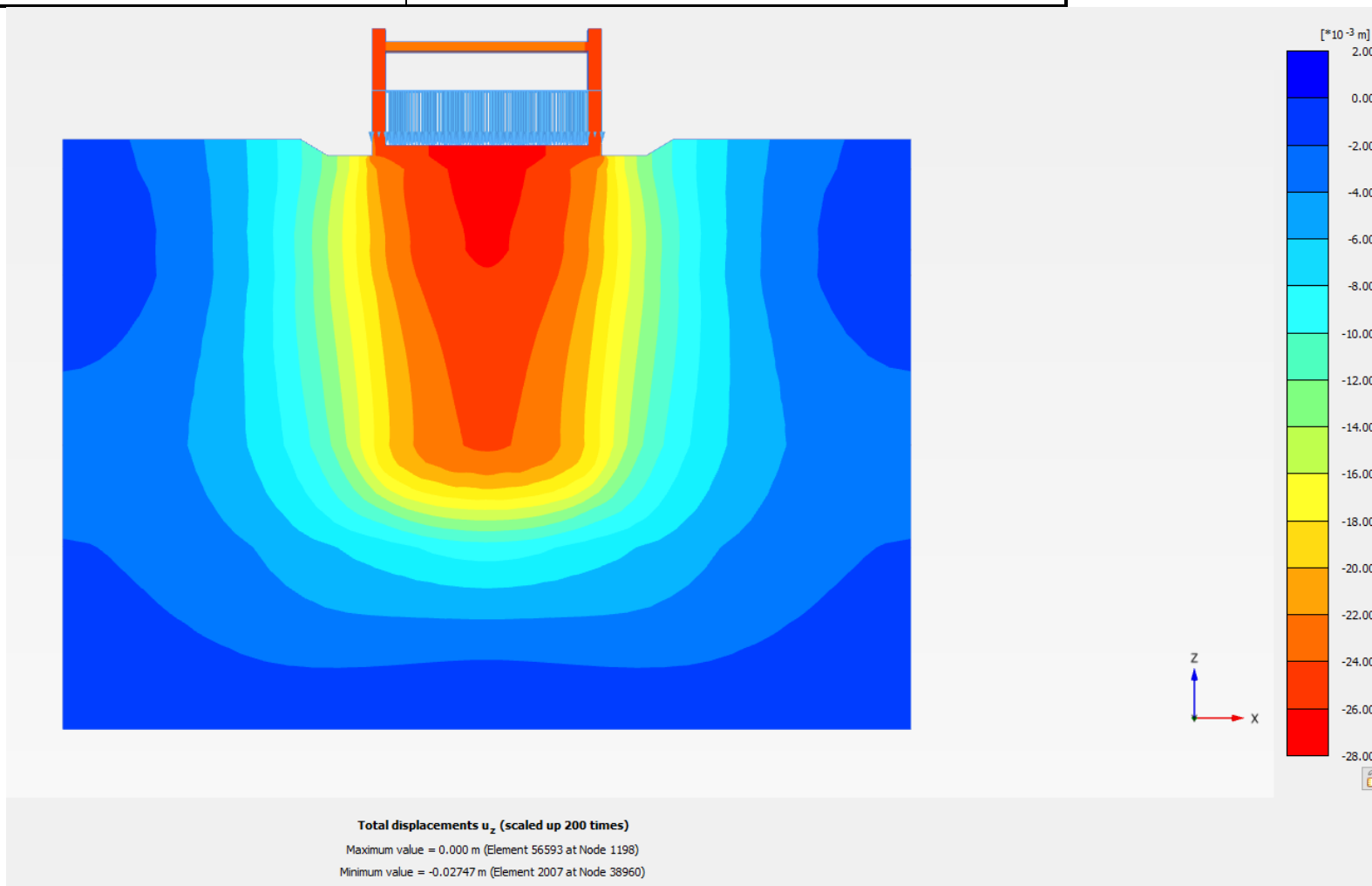


Figura 11.28: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi D – Spostamenti verticali al termine della costruzione

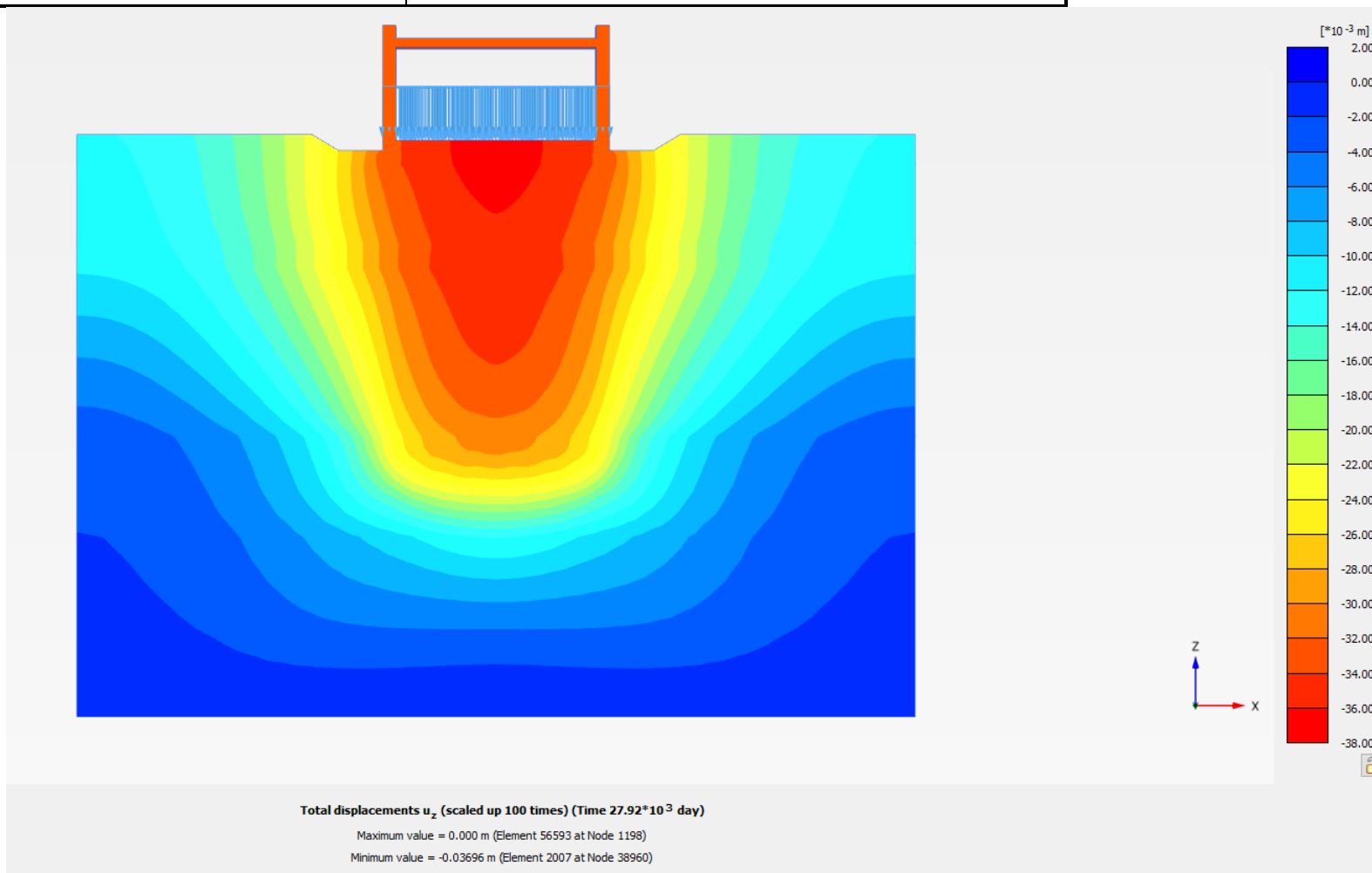


Figura 11.29: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi D – Spostamenti verticali a lungo termine

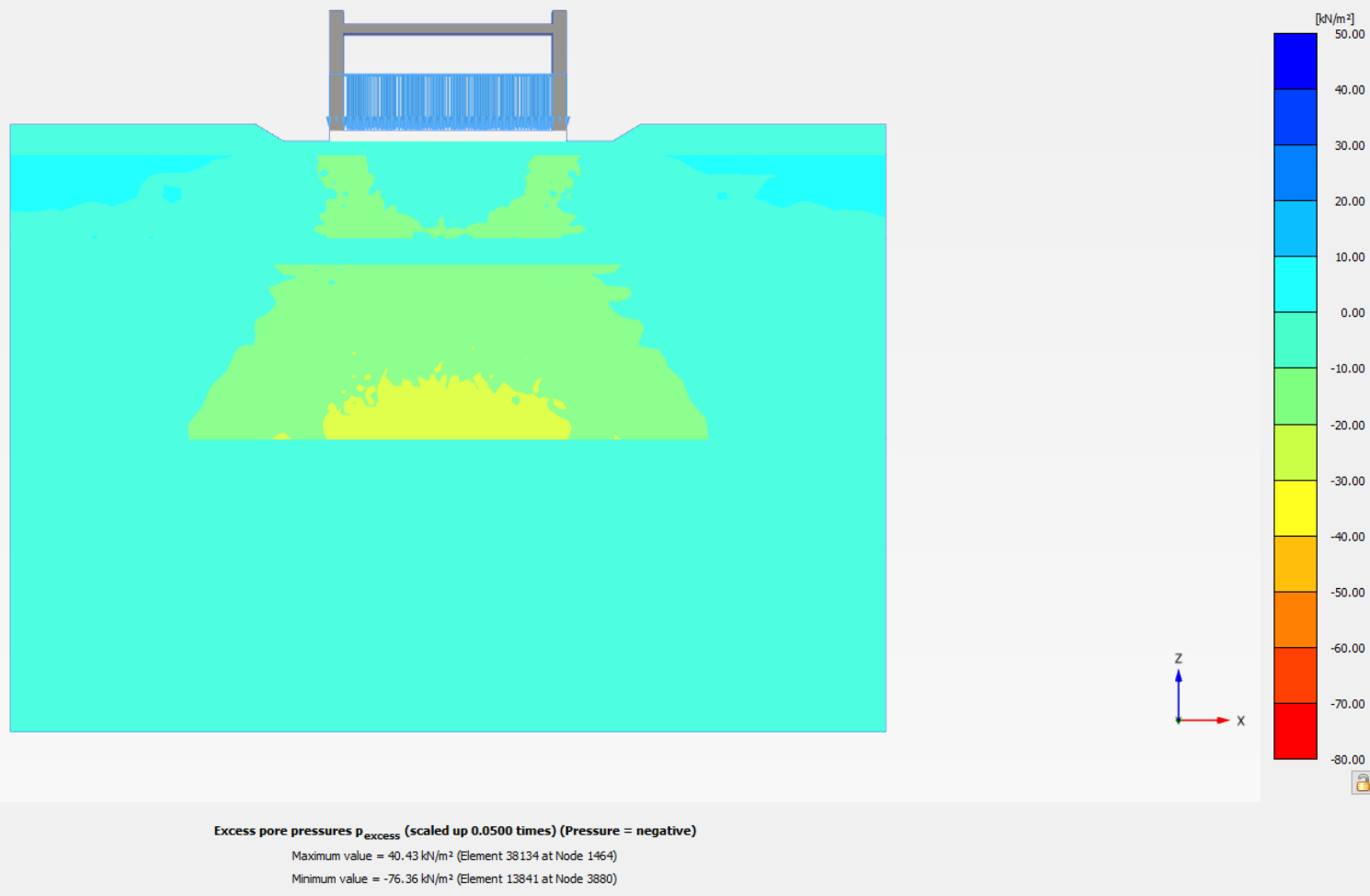


Figura 11.30: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi D – Sovrappressioni al termine della costruzione

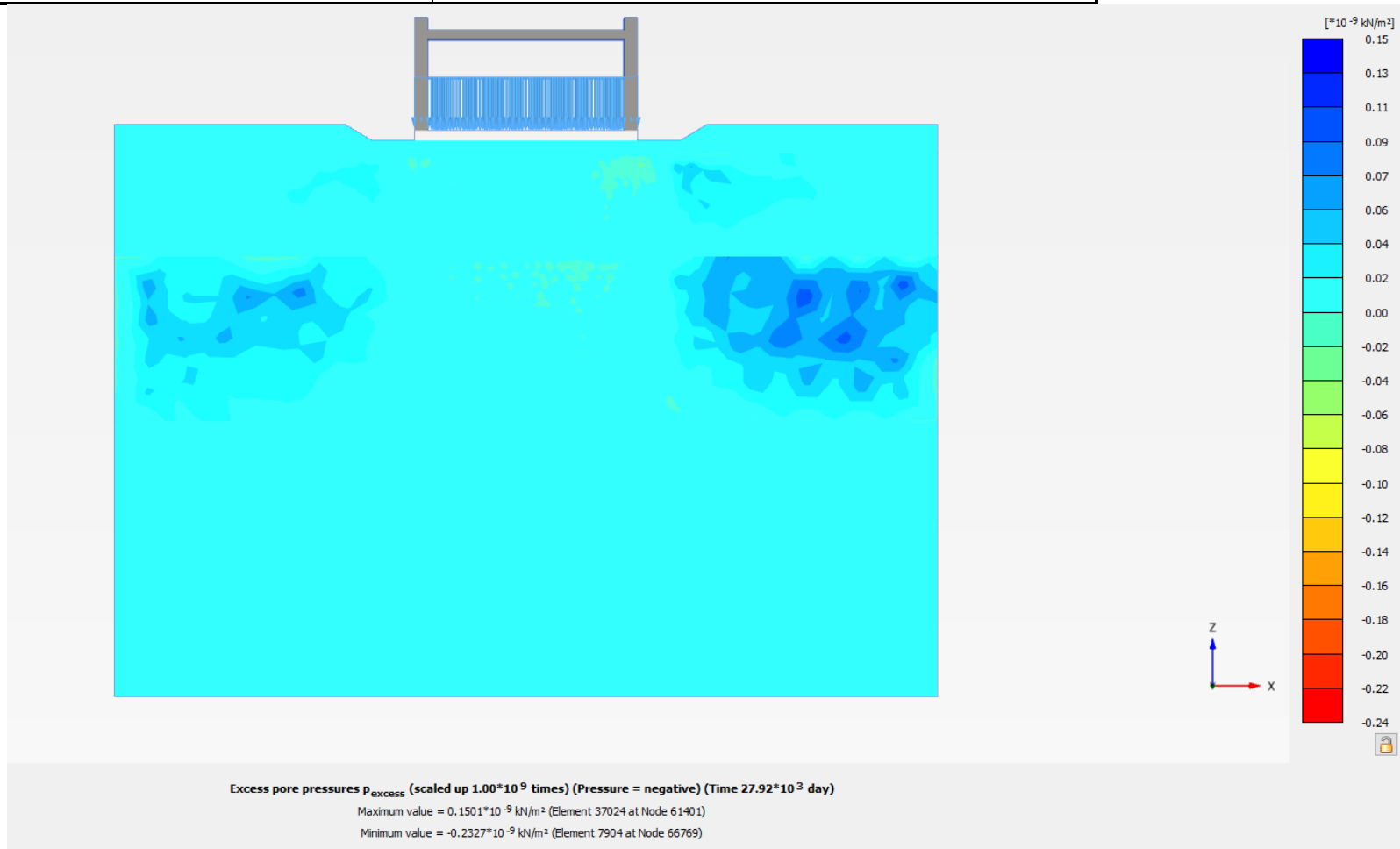



Figura 11.31: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Analisi D – Sovrappressioni a lungo termine

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ FASE					
	NPP 0258 GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD					
TRATTA: VIGNA CLARA – TOR DI QUINTO						
RELAZIONE DI PREDIMENSIONAMENTO RILEVATI E SCATOLARI	COMMESSA NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 96 di 106

11.3.10 *Cedimento secondario*

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. Tale cedimento può essere ritenuto nullo per la soluzione progettuale prescelta (Analisi D) in quanto gli incrementi tensionali nelle argille sono modesti (meno del 5% delle tensioni verticali geostatiche nello strato) essendo il carico trasferito sostanzialmente agli strati sottostanti le argille.

11.3.11 *Conclusioni*


Di seguito si riporta una sintesi dell'iter progettuale seguito per la scelta della tipologia di fondazione ottimale per lo scatolare, con le analisi svolte e i relativi risultati salienti.

Fondazione a platea su terreno naturale

Inizialmente è stata ipotizzata una fondazione a platea su terreno naturale (unità geotecnica LS). Il comportamento della fondazione è stato studiato tramite un'analisi FEM 2D. I risultati di quest'analisi indicano cedimenti dell'ordine di 10 cm nel breve termine, a fine costruzione dello scatolare, e 40 cm a lungo termine, non compatibili con l'esercizio della struttura; pertanto, sono state considerate soluzioni alternative comprendenti interventi di miglioramento profondo dei terreni di fondazione.

Fondazione a platea su terreno migliorato con colonne deep mixing

Come prima soluzione tecnica di miglioramento dei terreni di fondazione si è valutata l'efficacia di trattamento con colonne deep mixing, costituito da colonne di diametro 1000mm e lunghezza 25m, poste a interasse 2.5m, e strato ripartitore di spessore 1.6m, interposto tra la testa delle colonne e l'intradosso della soletta. Tale soluzione progettuale è stata simulata tramite un'analisi FEM 2D in cui l'intervento di miglioramento è stato modellato come volume di terreno equivalente, per lo spessore interessato dal trattamento. Il valore della rigidità equivalente è stato calibrato tramite modelli FEM 2D assialsimmetrici di una cella elementare di trattamento che hanno fornito un modulo di rigidità equivalente pari a 20MPa per l'intero volume trattato. Dall'analisi FEM della struttura risulta un cedimento massimo di circa 10 cm a breve termine e oltre 20 cm a lungo termine; seppure quest'ultimo valore risulta dimezzato rispetto a quello valutato dall'analisi senza alcun trattamento, esso eccede il valore ammissibile in quanto si osservano cedimenti non trascurabili al di sotto dei 25 m dove il terreno è di caratteristiche scadenti. Risulta pertanto


 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA 2^ 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	12R09	RH	GE0006001	A	97 di 106

necessario considerare un trattamento più profondo avente maggiore resistenza strutturale, quale ad esempio, le inclusioni rigide in calcestruzzo.

Fondazione a platea su terreno migliorato con inclusioni rigide intestate nello strato di argilla

Verificato che l'intervento con colonne deep mixing non è efficace ai fini di ridurre i cedimenti entro i valori ammissibili, si è considerato un intervento di miglioramento con inclusioni rigide. In prima istanza, si sono considerate inclusioni rigide di diametro 800mm e lunghezza 25m, dimensioni compatibili con le limitazioni tecnologiche di pali a elica continua (CFA). L'intervento è stato modellato tramite un'analisi FEM 3D in cui si è implementata una striscia elementare di larghezza pari all'interasse tra le inclusioni rigide, assunto pari a 2.4m; le inclusioni rigide sono state modellate esplicitamente con elementi di volume, in modo da simulare in maniera realistica il trasferimento del carico applicato sulla platea di fondazione alle inclusioni rigide e al terreno circostante, in funzione della loro rigidezza relativa. Considerando che lo spessore della soletta (1.2m) è tale da garantire un'adeguata ripartizione dei carichi sulle inclusioni rigide, si è ipotizzata una soluzione con soletta semplicemente appoggiata sui pali senza strato di ripartizione in materiale granulare compattato. Con questa configurazione, essendo i pali non collegati strutturalmente alla soletta, essi non assorbono sollecitazioni flettenti e taglianti significative, rendendo possibile l'impiego di pali non armati; la soletta andrà dimensionata a flessione e punzonamento tenendo conto delle azioni assiali concentrate trasmesse dai pali e dei cedimenti attesi.

I risultati dell'analisi indicano un cedimento massimo a lungo termine di circa 12 cm. Esaminando i risultati dell'analisi è possibile constatare che l'entità dei carichi applicati a estradosso fondazione è tale da produrre significativi incrementi tensionali alla base delle colonne di trattamento; a seguito di tali incrementi tensionali, che interessano argille normalconsolidate con compressibilità elevata, insorge un meccanismo deformativo globale con cedimenti significativi del terreno non trattato. Pertanto, sulla base di tali considerazioni si può concludere che l'intervento di miglioramento con inclusioni rigide con la geometria sopra descritta non è sufficiente al fine di ridurre i cedimenti entro i valori ammissibili; i risultati dell'analisi indicano chiaramente che nel caso in esame il fattore condizionante l'efficacia del trattamento è la lunghezza dei pali oltre al diametro o l'interasse, pertanto nell'iterazione successiva si è presa in considerazione una soluzione con pali intestati nell'unità geotecnica SL.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	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 NR4E	LOTTO 12R09	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0006001	REV. A	FOGLIO 98 di 106

Fondazione a platea su terreno migliorato con inclusioni rigide intestate nello strato di sabbia

Sulla base dei risultati delle analisi intermedie prima descritte, si è ipotizzata quale soluzione progettuale una platea appoggiata su inclusioni rigide di lunghezza 38m, intestate nell'unità geotecnica SL per una lunghezza pari a circa 4D. L'intervento è stato analizzato tramite un modello FEM 3D. Data la lunghezza necessaria delle inclusioni rigide (i.e. 38 m), la tecnologia esecutiva applicabile è quella di palo trivellato, di diametro 1000mm. Avendo tale palo una notevole capacità geotecnica e strutturale, si è ritenuto valido adottare una spaziatura di 4D. Al fine di valutare in maniera realistica le deformazioni della fondazione e dei pali e le conseguenti sollecitazioni il modello di calcolo è stato affinato rispetto all'iterazione precedente, introducendo la struttura dello scatolare modellata esplicitamente con elementi di volume; in tal modo è stato possibile tenere conto del contributo irrigidente della struttura fuori terra.

I risultati dell'analisi indicano che intestando i pali nello strato SL i carichi applicati in fondazione vengono trasmessi quasi interamente a questo strato attraverso i pali, con incrementi tensionali ridotti nello strato di argilla; tale meccanismo di trasmissione dei carichi comporta una sostanziale riduzione dei cedimenti assoluti in fondazione, che risultano dell'ordine di 3 cm a breve termine e 4 cm a lungo termine. Inoltre, la soluzione progettuale in esame, limitando il trasferimento del carico allo strato argilloso tenero, normalconsolidato, provoca una riduzione sostanziale dei cedimenti secondari che altrimenti si innescherebbero. Pertanto, si può concludere che l'intervento con pali intestati nelle sabbie risulta efficace nel limitare i cedimenti attesi ai valori ammissibili e rappresenta una soluzione progettuale ottimale per il caso in esame.

In Figura 11.32 e Figura 11.34 si riporta lo spostamento verticale lungo una sezione verticale in corrispondenza dell'asse dello scatolare, valutato a termine di tutte le fasi di costruzione del rilevato e messa in opera (ovvero trascorso un anno dalla posa dell'armamento ferroviario) e a lungo termine, per le varie soluzioni progettuali sopra descritte. In Figura 11.33 e Figura 11.35 si riporta lo spostamento verticale lungo una sezione orizzontale in corrispondenza dell'intradosso dello scatolare per le stesse fasi di calcolo. I risultati in termini di cedimento massimo atteso a breve termine e a lungo termine, per le varie soluzioni progettuali, sono sintetizzati in Tabella 11.9. Per la sola Analisi C, per la quale è stata effettuata un'analisi in condizioni drenate, si sono riportati i soli spostamenti a lungo termine.

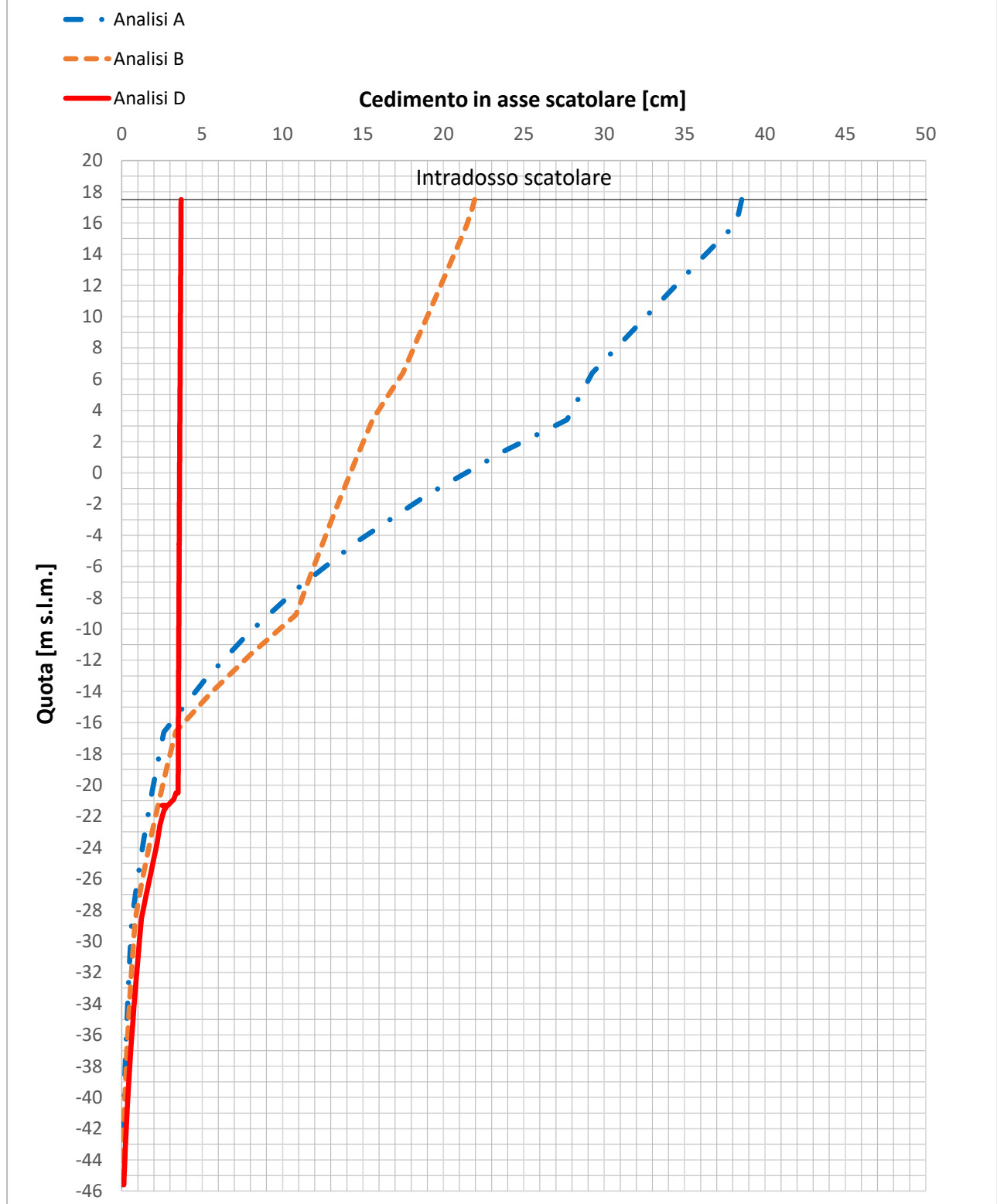


Figura 11.32: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Spostamenti verticali in corrispondenza dell'asse dello scatolare a fine costruzione per le varie soluzioni progettuali analizzate

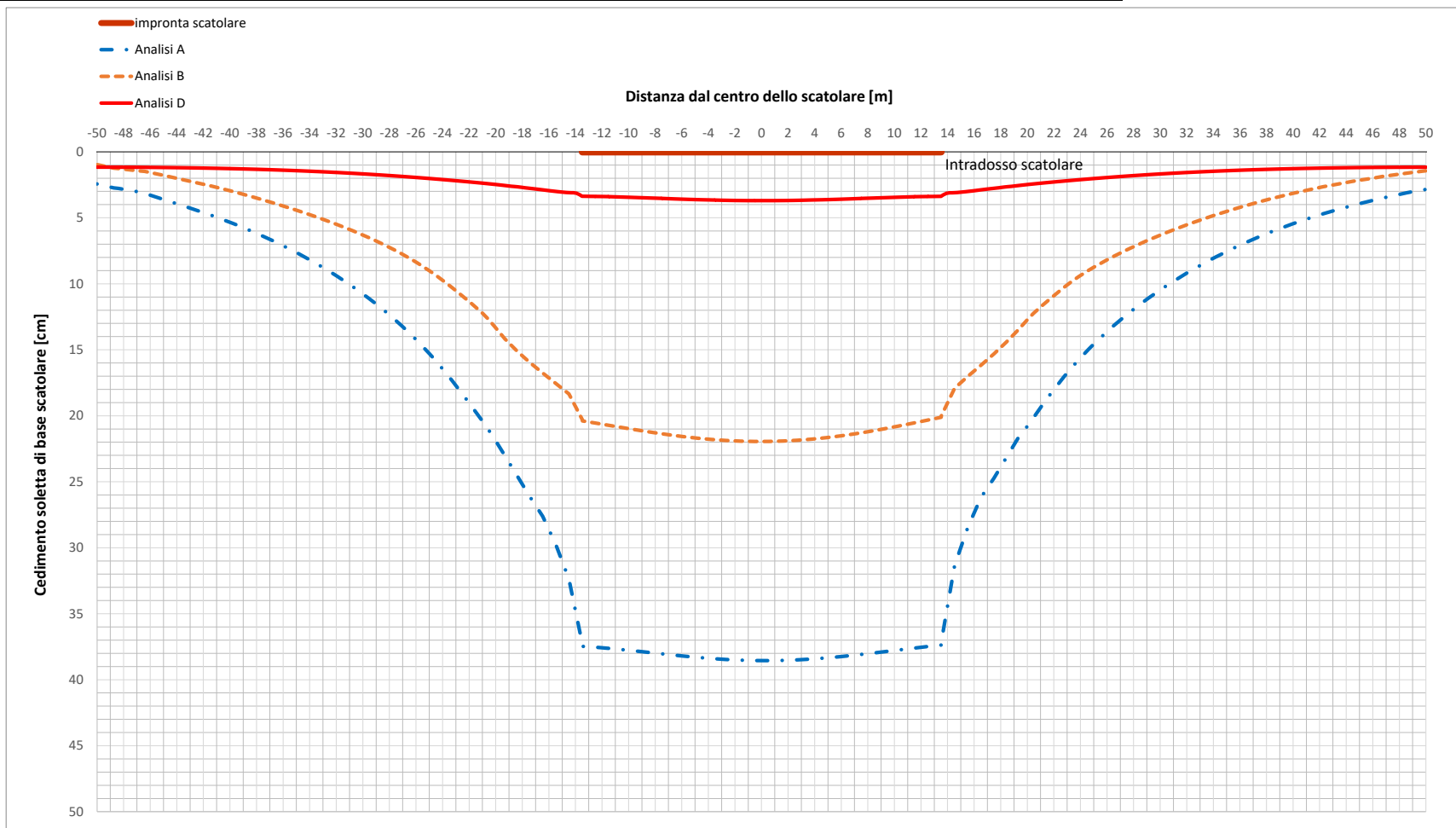


Figura 11.33: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Profilo trasversale degli spostamenti verticali lungo lo scatolare a fine costruzione, per le varie soluzioni progettuali analizzate

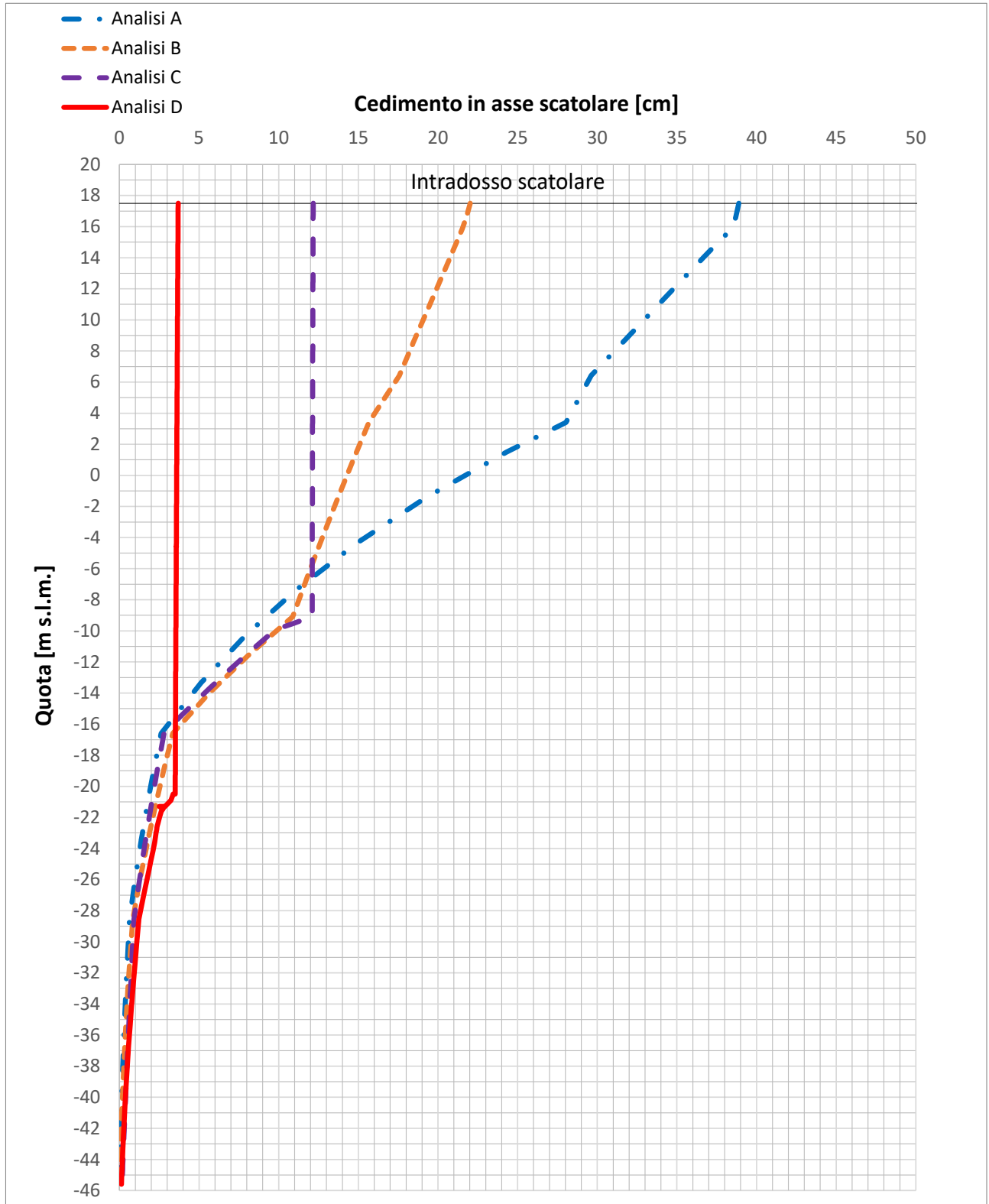


Figura 11.34: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Spostamenti verticali in corrispondenza dell'asse dello scatolare a lungo termine per le varie soluzioni progettuali analizzate

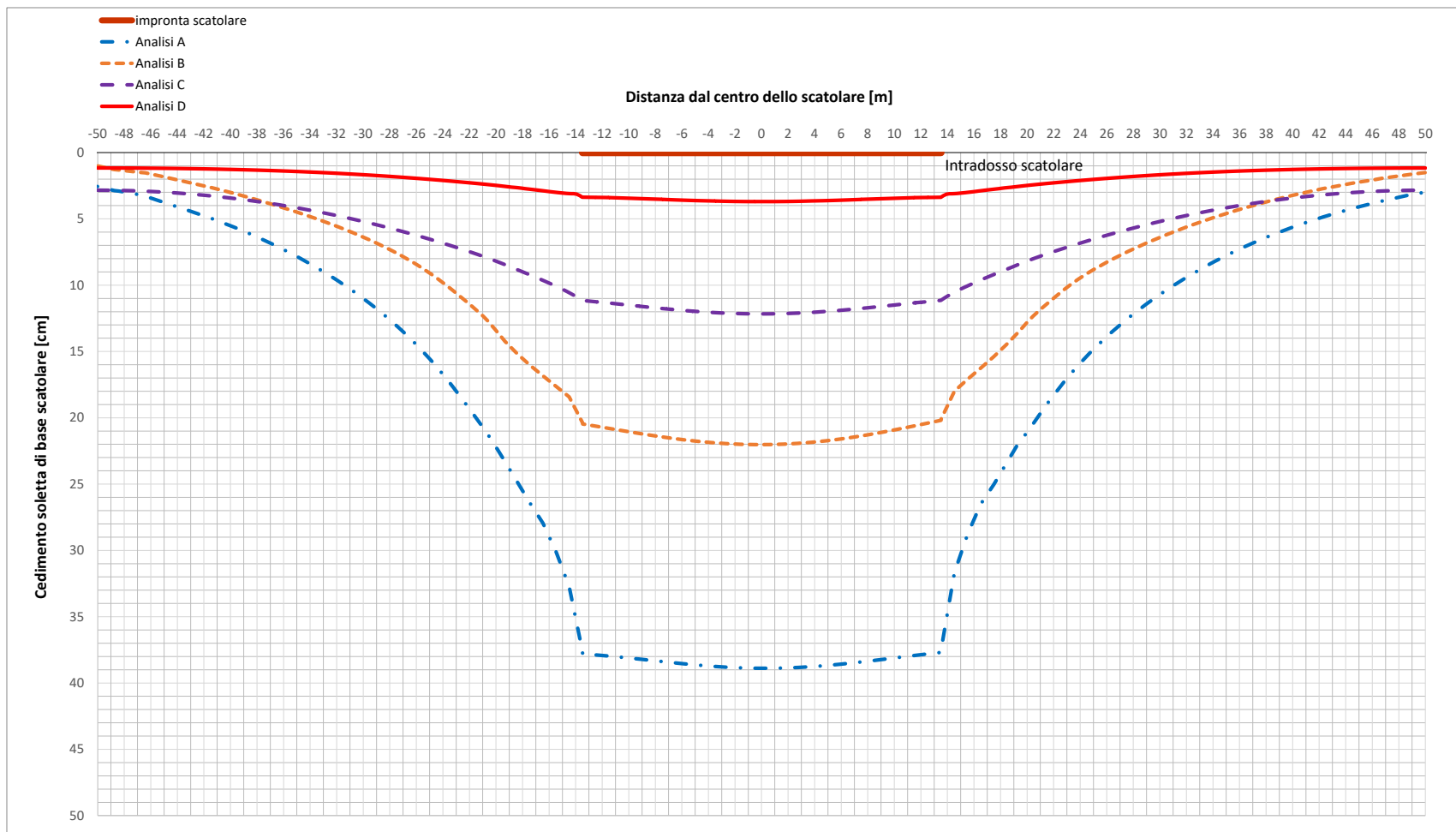


Figura 11.35: Scatolare Stazione Tor di Quinto, sezione pk 1+550 – Profilo trasversale degli spostamenti verticali lungo lo scatolare a lungo termine, per le varie soluzioni progettuali analizzate

Tabella 11.9: Sintesi delle soluzioni progettuali analizzate per la fondazione dello Scatolare Tor di Quinto

Soluzione progettuale	Identificativo analisi numerica	Cedimento massimo a breve termine ^[1] [cm]	Cedimento massimo a lungo termine [cm]
Platea su terreno naturale	Analisi A	11	39
Platea su colonne deep mixing	Analisi B	10	22
Platea su inclusioni rigide intestate nello strato AL1	Analisi C	-	12
Platea su inclusioni rigide intestate nello strato SL	Analisi D	3	4

^[1] Per la sola Analisi C il cedimento è stato valutato a lungo termine effettuando un'analisi in condizioni drenate

11.3.12 Intervento di miglioramento con inclusioni rigide – Intensità del trattamento

Le analisi fin qui descritte fanno riferimento alla sezione dello scatolare più onerosa in termini di geometria e carichi applicati. Al fine di modulare l'intensità del trattamento lungo lo sviluppo longitudinale dello scatolare, lo stesso è stato suddiviso in cinque aree, caratterizzate da larghezza dei conci e carichi applicati pressoché omogenei (Figura 11.36); l'interasse trasversale e longitudinale tra le inclusioni rigide è stato valutato in modo da limitare il carico applicato sulla singola inclusione rigida a valori tali da soddisfare le verifiche in fase di esercizio strutturali e geotecniche. In particolare, il carico applicato sulla singola inclusione rigida è stato valutato in via semplificata per aree di influenza; le verifiche da soddisfare in esercizio riguardano le tensioni di lavoro nel calcestruzzo, sul piano strutturale, e la verifica del fattore di sicurezza sulla sola resistenza laterale, sul piano geotecnico. Entrambe le verifiche risultano ampiamente soddisfatte considerando gli interassi riportati in Tabella 11.10, che possono essere utilizzati per una valutazione di massima delle quantità relative all'intervento di miglioramento in esame e relativo costo.

In Figura 11.37 e Figura 11.38 si riportano due sezioni indicative con la disposizione delle inclusioni rigide per la sezione centrale e la sezione di estremità dello scatolare.

Tabella 11.10: Interasse trasversale e longitudinale delle inclusioni rigide per lo Scatolare Tor di Quinto

Zona	Interasse trasversale [m]	Interasse longitudinale [m]	Area di influenza [m ²]	Carico in fondazione [kPa]	Carico per palo [kN]
Zona centrale	4	4	16	120	1920
Zona di estremità	5.6	4.25	23.7	90	2130
Zona intermedia	4.5	4.25	19.1	110	2104

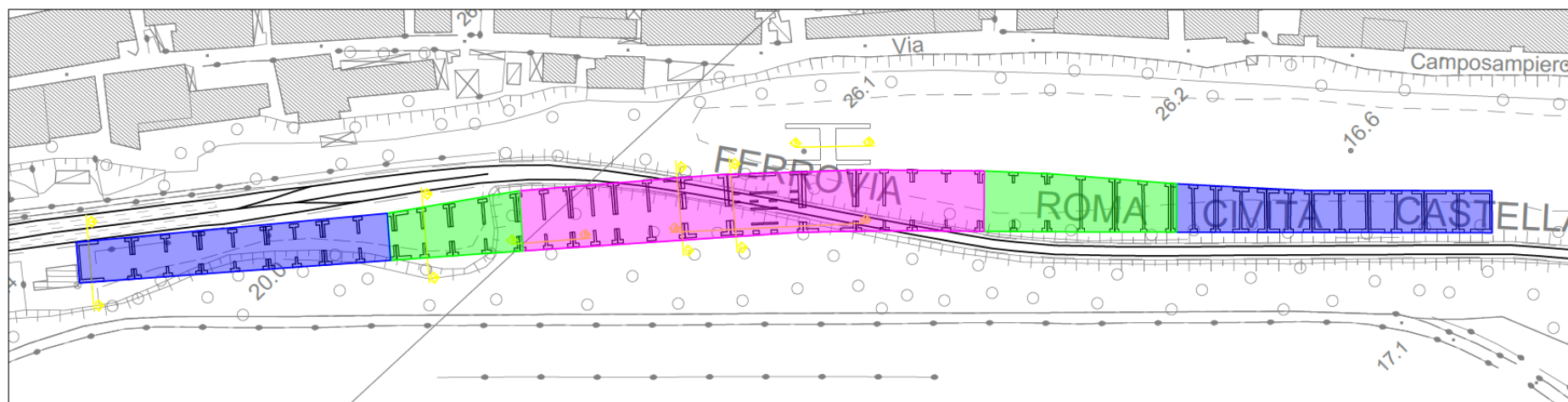


Figura 11.36: Planimetria dello scatolare con suddivisione in aree omogenee per trattamento con inclusioni rigide

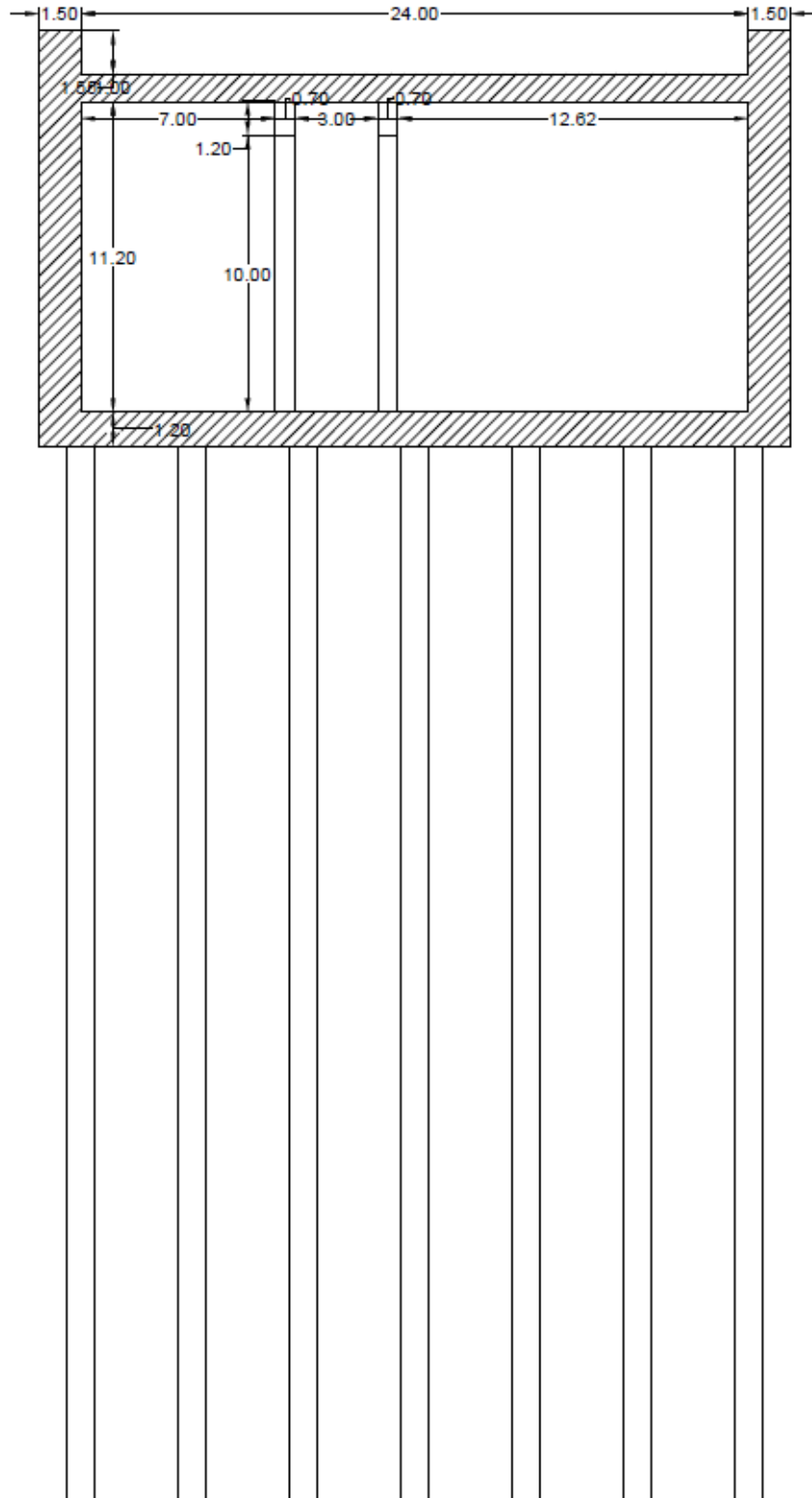


Figura 11.37: Sezione in corrispondenza del concio centrale dello scatolare

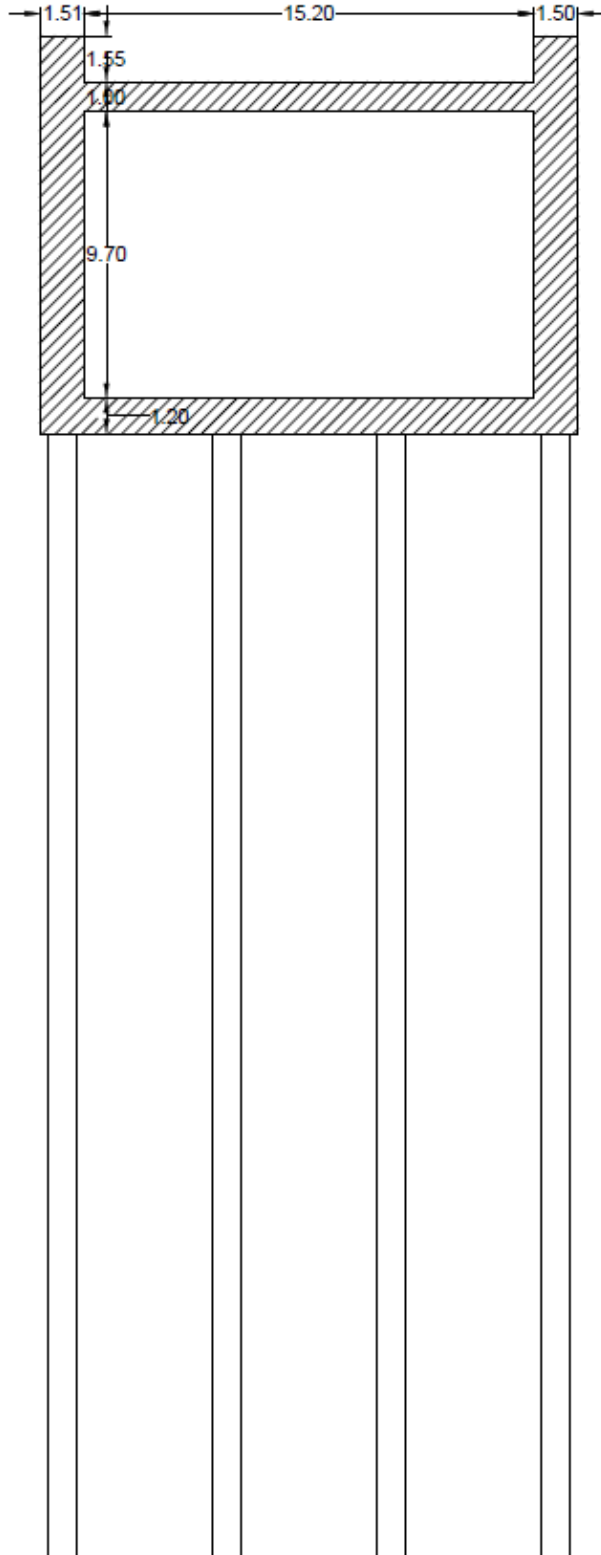


Figura 11.38: Sezione di estremità dello scatolare