

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP J34H16000620009

U.O. Coordinamento Territoriale Nord

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE

Posti di Movimento e Varianti di Tracciato

Lotto 4: Variante Isonzo

GEOTECNICA - Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati

SCALA:

-

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

I Z 0 4 4 0 R 2 6 R H G E 0 0 0 0 0 0 2 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Definitiva	S. Corti	Giugno 2021	R. Lestingi	Giugno 2021	S. Lo Presti	Giugno 2021	A. BEREGO Giugno 2021

File: IZ0430R26RHGE0000002A

n. Elab.:

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	4
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	5
2.1 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO E DI BASE.....	5
2.2 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO.....	5
2.3 SOFTWARE.....	6
3. DESCRIZIONE DEL TRACCIATO.....	7
4. CRITERI DI VERIFICA IN ACCORDO ALLE NTC2018.....	8
4.1 GENERALE.....	8
4.2 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI.....	9
4.2.1 Verifiche Stati Limite Ultimi (SLU).....	9
4.2.2 Verifiche Stati limite di esercizio (SLE).....	11
4.3 STABILITÀ DEL SITO NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE.....	12
4.4 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI.....	13
4.4.1 Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche.....	13
4.4.2 Verifiche Stati limite ultimi (SLU).....	14
4.4.3 Stati limite di esercizio (SLE).....	15
5. COEFFICIENTI SISMICI PER LE VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE.....	16
6. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA.....	17
6.1 CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI.....	17
6.1.1 Slope/W.....	17
6.1.2 Plaxis 2D.....	17
6.2 METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE.....	17
6.2.1 Verifiche di stabilità.....	17
6.2.2 Valutazione degli spostamenti.....	18
7. CARATTERISTICHE DEL CORPO FERROVIARIO.....	19

7.1	GEOMETRIA DEI RILEVATI FERROVIARI	19
7.2	MATERIALI E PARAMETRI GEOTECNICI	20
7.3	CARICHI DI PROGETTO	20
7.3.1	<i>Carichi ferroviari per le Verifiche SLU</i>	21
7.3.2	<i>Carichi ferroviari per le Verifiche SLE</i>	22
8.	CALCOLO E RISULTATI	23
8.1	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO	23
8.2	CARICHI DI PROGETTO	24
8.3	VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE	24
8.3.1	<i>Risultati</i>	25
8.4	VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI	28
8.4.1	<i>Modelli e fasi di calcolo</i>	28
8.4.2	<i>Risultati</i>	30

	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA IZ04	LOTTO 40 R 26	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0000 002	REV. A	FOGLIO 4 di 34

1. INTRODUZIONE

Il presente documento riporta le verifiche geotecniche, ai sensi della Normativa vigente (NTC 2018), relative alle sezioni caratteristiche dei tratti in rilevato delle rampe di approccio al nuovo viadotto in variante sul fiume Isonzo.

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 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 8 riporta le verifiche condotte ed i risultati ottenuti.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	5 di 34

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO E DI BASE

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

- [1] ITALFERR – PFTE – Potenziamento Linea Venezia Trieste, Posti di Movimento e Varianti di Tracciato – Lotto 4: Variante Isonzo – Relazione Geotecnica (Doc. Rif. – IZ0440R26RHGE0000001)
- [2] ITALFERR – PFTE – Potenziamento Linea Venezia Trieste, Posti di Movimento e Varianti di Tracciato – Lotto 4: Variante Isonzo – Plano-Profilo geotecnico (IZ0440R26L6GE0000001/3)

2.2 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO

- [3] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n.29 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.30.
- [4] Circolare del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 21 gennaio 2019, n. 7 del Consiglio superiore dei Lavori Pubblici recante “Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”
- [5] RFI DTC SI MA IFS 001 E del 31.12.2020- “MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI”.
- [6] RFI DTC INC CS LG IFS 001 A del 21.12.2011 – “Linee guida per il collaudo statico delle opere in terra”.
- [7] RFI DTC SI SP IFS 001 D del 20.12.2019- Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Parte II – Sezione 5 – “Opere in terra e scavi” – RFI.
- [8] RFI DTC SI GE SP IFS 003 A del 22.12.2017- Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Parte II – Sezione 18 – “Utilizzo di aggregati riciclati e trattamenti con calce per opere in terra”– RFI.
- [9] RFI TCAR ST AR 01 001 D “Standard di qualità geometrica del binario e parametri di dinamica di marcia per linee con velocità fino a 300km/h”
- [10] Regolamento (UE) N.1299/2014 della Commissione del 18 Novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario dell'Unione Europea, modificato dal Regolamento di esecuzione (UE) N°2019/776 della Commissione del 16 Maggio 2019

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo</p>												
<p>Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IZ04</td> <td>40 R 26</td> <td>RH</td> <td>GE0000 002</td> <td>A</td> <td>6 di 34</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	6 di 34
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	6 di 34								

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

2.3 SOFTWARE

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA IZ04	LOTTO 40 R 26	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0000 002	REV. A

3. DESCRIZIONE DEL TRACCIATO

Il potenziamento della linea Venezia-Trieste prevede diverse opere lungo il tracciato. Il progetto in particolare prevede lo sviluppo di un nuovo Posto Movimento a San Donà di Piave e a Fossalta, varianti ferroviarie con nuovi rilevati e/o viadotti a Portogruaro e sul fiume Isonzo.

In questo documento ci si occupa in particolare delle rampe di approccio al nuovo viadotto sul fiume Isonzo (vedi Figura 3.1), in cui la piattaforma ferroviaria viene allargata in maniera sostanzialmente simmetrica per permettere l'alloggiamento di due nuovi binari, uno su ogni lato rispetto alla ferrovia esistente. L'intervento in generale si sviluppa tra il km 101+761 e il km 105+831 circa, per una lunghezza complessiva leggermente superiore a 4000 m.

La campagna geognostica ha mostrato la presenza di livelli locali a grana fine nei primi metri di profondità. Tuttavia, anche per le massime altezze di rilevato previste non si riscontrano particolari problematiche.

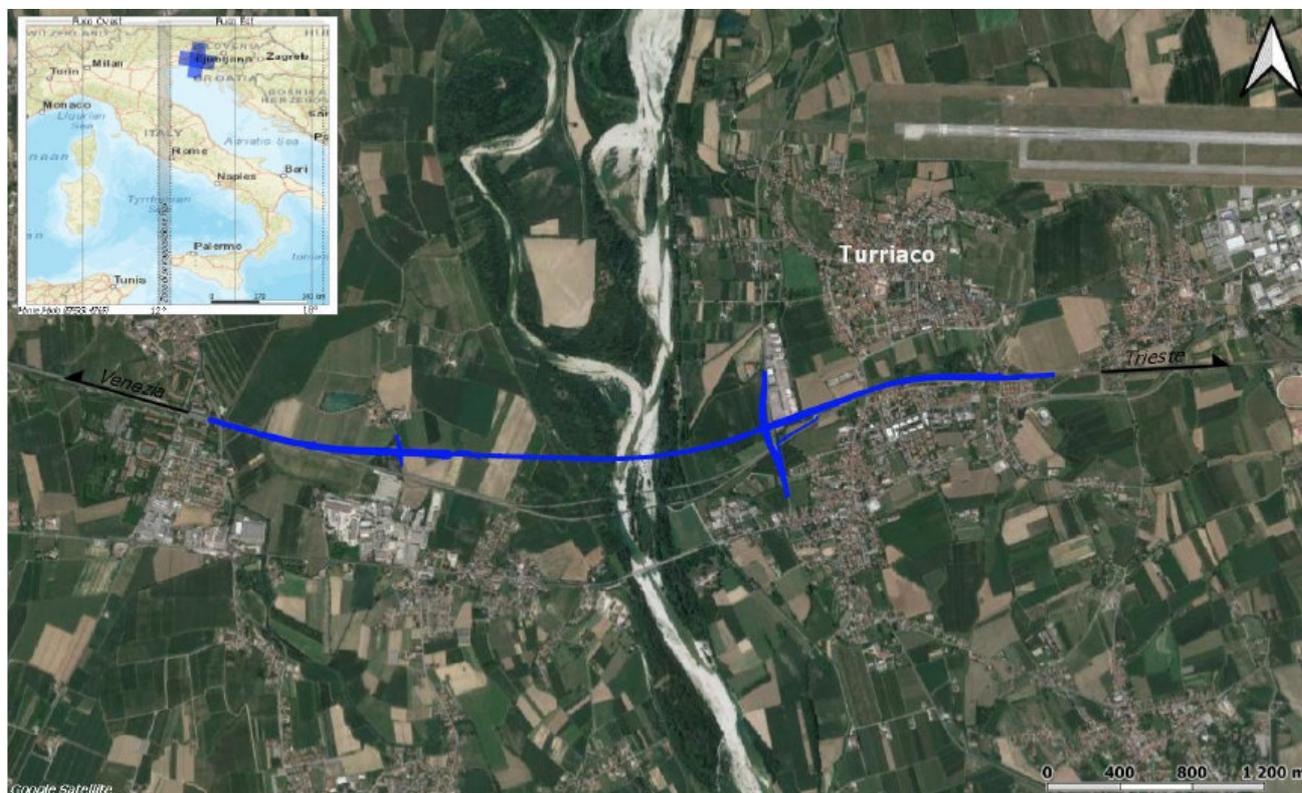


Figura 3.1- Tracciato di progetto – Variante Isonzo

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	8 di 34

4. CRITERI DI VERIFICA IN ACCORDO ALLE NTC2018

4.1 GENERALE

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

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

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

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

dove:

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

R_d = valore di progetto della resistenza.

La verifica della condizione $E_d \leq R_d$ deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni ($A1$ e $A2$), per i parametri geotecnici ($M1$ e $M2$) e per le resistenze ($R1$, $R2$ e $R3$). I coefficienti da adottarsi nelle diverse combinazioni sono definiti in funzione del tipo di verifica da effettuare (si vedano i paragrafi seguenti). Si sottolinea che per quanto concerne le azioni di progetto E_d tali forze possono essere determinate applicando i coefficienti parziali di cui sopra alle azioni caratteristiche, oppure, a posteriori, sulle sollecitazioni prodotte dalle azioni caratteristiche (Par. 6.2.3.1 del Doc. Rif. [3]).

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

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

dove:

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

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

La verifica della condizione $E_d \leq C_d$ deve essere effettuata impiegando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici dei materiali. All'interno del progetto devono essere quindi definite le prescrizioni relative agli spostamenti compatibili per l'opera e le prestazioni attese.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	9 di 34

4.2 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI

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

4.2.1 Verifiche Stati Limite Ultimi (SLU)

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

Approccio 1 - Combinazione 2: A2 + M2 + R2 tenendo conto dei coefficienti parziali definiti in Tabella 4.1, Tabella 4.4 e Tabella 4.5 (rispettivamente Tab.6.2.I, Tab.6.2.II e Tab.6.8.I del Doc. Rif. [3]).

La verifica di stabilità globale si ritiene soddisfatta se:

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

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

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

Facendo riferimento a quanto previsto al p.to 3.5.2.3.8 del Manuale di Progettazione RFI DINIC MA CS 00 001 C, parte IV (Doc. Rif. [5]), per le verifiche agli stati limite ultimi si adottano i valori dei coefficienti parziali definiti in Tabella 4.1 (Tab. 6.2.I del Doc. Rif. [3]) e i coefficienti di combinazione ψ definiti in Tabella 4.2 e Tabella 4.3 (Tab. 5.2.VI e Tab. 5.2. VII del Doc. Rif. [3]).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	10 di 34

Tabella 4.1: Coefficienti parziali sulle azioni (Tab. 6.2.I del Doc. Rif. [3])

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

	Effetto	Coefficiente Parziale 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_{G1}

In Tabella 4.1 (Tab. 5.2.V del Doc. Rif. [3]) 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. [3])

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 ⁽²⁾	0,0
Gruppi di	gr_2	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽²⁾	-
carico	gr_3	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽²⁾	0,0
	gr_4	1,00	1,00 ⁽²⁾	0,0
Azioni del vento	F_{Wk}	0,60	0,50	0,0
Azioni da	in fase di esecuzione	0,80	0,0	0,0
neve	SLU e SLE	0,0	0,0	0,0
Azioni termiche	T_k	0,60	0,60	0,50

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

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	11 di 34

Tabella 4.3: Coefficienti di combinazione ψ delle azioni (Tab. 5.2.VII Doc. Rif. [3])

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. [3])

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
Coesione 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. [3])

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

	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	12 di 34

Nello specifico, come riportato nei Doc. Rif. [5], RFI stabilisce un valore soglia degli spostamenti residui attesi, corrispondenti ad uno Stato Limite di Esercizio (s_{SLE}), pari a 5 cm ed inferiori al 10% del cedimento di lungo termine. Inoltre, nel caso di rilevato ferroviario da realizzare in affiancamento e/o appoggio ad un rilevato esistente mantenendo quest'ultimo in esercizio durante i lavori, devono essere studiati gli effetti sullo stesso secondo quanto indicato al §3.8.1.3.4.2 del Doc. Rif. [5] e in Doc. Rif. [9].

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

4.3 STABILITÀ DEL SITO NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE

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

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

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

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

Per il tracciato oggetto del presente studio, le verifiche di liquefazione sono contenute nella Relazione geotecnica (Doc. Rif. [1]); in sintesi risulta che seppur presenti alcuni spessori di materiale suscettibile a liquefazione, per i quali i valori dei cedimenti post-sisma ottenuti e i valori degli LPI stimati risultano non nulli, i valori ottenuti di LPI sono da ritenersi trascurabili ai fini progettuali escludendo quindi il rischio di liquefazione nella tratta in esame.

	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	13 di 34

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

4.4.1 Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche

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

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

La Tabella 4.6 riporta, in funzione della classe d'uso della struttura, lo stato limite da considerare in funzione della verifica di sicurezza appropriata per l'opera (Tabella C7.3.I del Doc. Rif. [4]).

Tabella 4.6: Verifiche di sicurezza in funzione della Classe d'uso (Tab. C7.3.I, Doc. Rif. [4])

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

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

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

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

4.4.2 Verifiche Stati limite ultimi (SLU)

Per tutte le verifiche l'azione sismica di progetto deve essere valutata sulla base degli Stati Limite relativi all'opera da verificare (vedasi Doc. Rif. [3]). Per l'opera in oggetto, le verifiche agli Stati Limite Ultimi verranno condotte con riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (**SLV**).

Le verifiche di sicurezza agli SLU in campo sismico devono contemplare almeno le medesime verifiche definite in campo statico. In particolare, la stabilità globale in condizioni sismiche delle opere in materiali sciolti, quali rilevati, deve essere svolta impiegando lo stesso approccio di cui al par 6.8.2 del Doc. Rif. [3], ,

	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo												
Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	<table border="1"> <thead> <tr> <th>COMMESSA</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IZ04</td> <td>40 R 26</td> <td>RH</td> <td>GE0000 002</td> <td>A</td> <td>15 di 34</td> </tr> </tbody> </table>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	15 di 34
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	15 di 34								

ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a $\gamma_R = 1.2$. (vedasi Par.7.11.4 del Doc. Rif. [3]).

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

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

4.4.3 Stati limite di esercizio (SLE)

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

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

	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA IZ04	LOTTO 40 R 26	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0000 002	REV. A

5. COEFFICIENTI SISMICI PER LE VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE

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

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

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

a_{max} = accelerazione sismica di progetto definita nella Relazione geotecnica (Doc. Rif. [1]), pari a 0.241g.

β_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito. Come chiarito al Par. 7.11.4 del Doc. Rif. [3] il valore del coefficiente 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

a_{max} (g)	k_H	k_V
0.241	0.092	± 0.046

	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA IZ04	LOTTO 40 R 26	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0000 002	REV. A

6. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA

6.1 CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI

6.1.1 *Slope/W*

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

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

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

6.1.2 *Plaxis 2D*

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

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

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

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

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	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA IZ04	LOTTO 40 R 26	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0000 002	REV. A

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

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

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

6.2.2 Valutazione degli spostamenti

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

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

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

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

7. CARATTERISTICHE DEL CORPO FERROVIARIO

7.1 GEOMETRIA DEI RILEVATI FERROVIARI

I rilevati ferroviari del nuovo rilevato sono previsti con pendenza 3H:2V. L'altezza massima, compreso il pacchetto di ballast è dell'ordine di 6.25m, in corrispondenza dell'approccio al viadotto. Al di sotto del rilevato è previsto uno scotico per uno spessore pari a 0.5 m. In Figura 7.1 si riporta una sezione del rilevato ferroviario dove questo presenta maggiore altezza.

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.

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

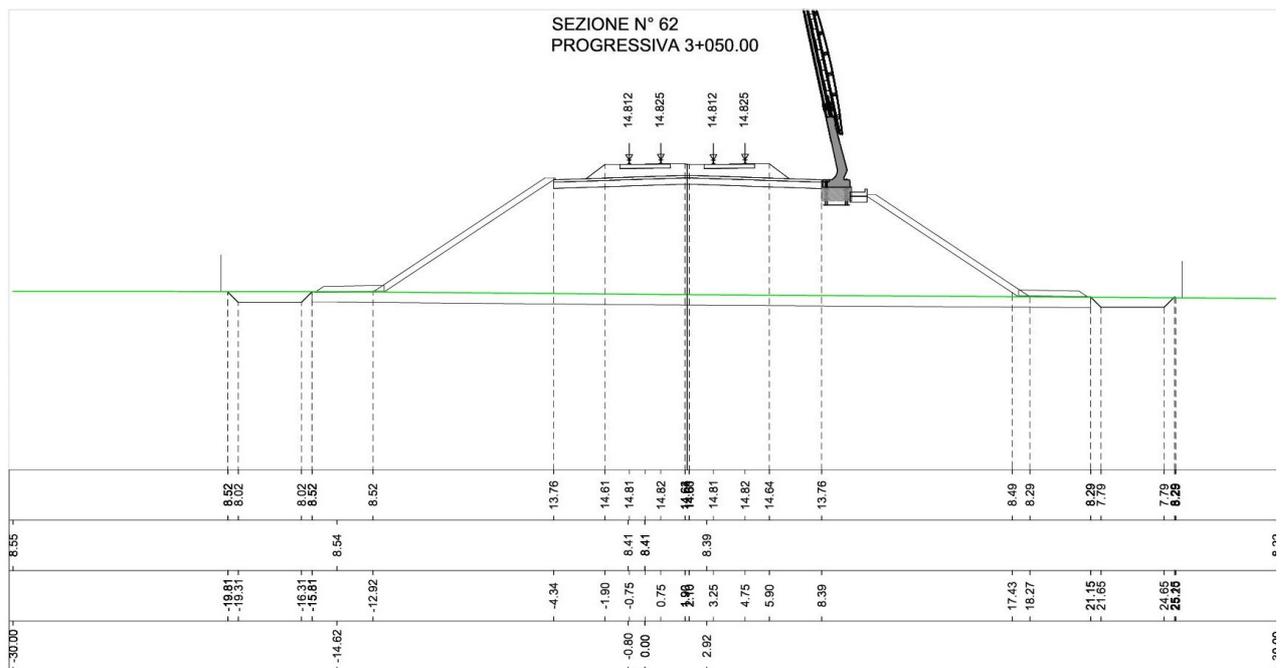


Figura 7.1: - Stralcio di sezione del rilevato del PM in corrispondenza della maggiore altezza

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	20 di 34

7.2 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 7.1.

Come anticipato nei paragrafi precedenti, l'inerbimento superficiale, ma anche lo strato di supercompattato, il ballast e il sub-ballast sono stati modellati con lo stesso materiale costituente il rilevato. Anche lo strato di bonifica viene considerato con le stesse caratteristiche del materiale di rilevato.

Tabella 7.1: Parametri geotecnici di calcolo – materiali costituenti il rilevato

STRATO	Spessore	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Modulo di Young operativo	Permeabilità
			ϕ'_k	ϕ'_d M2	c'_k	c'_d M2		
	[m]	γ_d	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	$E_{op.}$	k.
RILEVATO E RIPARTITORE	Variabile	20	38	32	0	0	30	1×10^{-5}
STRATO DI SCOTICO E BONIFICA	0.5	20	38	32	0	0	30	1×10^{-5}

7.3 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; per le sole analisi di stabilità).
- Carico rappresentativo del traffico ferroviario.
- Carico da azione sismica.

Nelle analisi di stabilità, l'armamento ferroviario è stato schematizzato, in accordo a quanto riportato al par 5.2.2.1. del Doc. Rif. [3] e nel Doc. Rif. [5], per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14.4 kPa, rappresentativo di uno strato di spessore pari a circa 0.80 m con un peso pari a 18 kN/m³. Il carico è stato applicato sulla sommità del rilevato per una larghezza complessiva di circa 10 m.

Per la definizione del sovraccarico da traffico ferroviario si sono valutate le pressioni equivalenti dovute sia al treno per traffico normale LM71 sia per quello da traffico pesante SW/2, secondo quanto definito sia dalle NTC2018 (punti 5.2.2.2.1.1 e 5.2.2.2.1.2. del Doc.Rif.[3]) sia dal "MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI" (RFI DTC SI MA IFS 001 E del 31.12.2020, Doc.Rif.[5]).

	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	21 di 34

In particolare, assumendo per il sovraccarico da traffico ferroviario il modello di carico LM71 (traffico normale) 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);
- Considerando cautelativamente il passaggio contemporaneo di due treni il sovraccarico diventa $156.25 \cdot 2 = 312.5$ kN/m.
- Considerando per semplicità la stessa larghezza dell'armamento il sovraccarico su 10 m diventa 31.25 kPa.

Per il tipo di traffico caratterizzante la linea, sulla base di quanto indicato nel Doc.Rif.[10], si è assunto un coefficiente di amplificazione α pari a 1.1. Pertanto, il valore di pressione risultante è pari a 34.38 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.

7.3.1 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 10m. 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:

$$q_d = q_k \times \gamma_{G1 [A2]} = 14.4 \text{ kPa} \times 1.0 = 14.4 \text{ kPa}$$

- Il carico da traffico ferroviario (q), assunto pari a 34.38 kPa, è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita applicata sulla stessa impronta dell'armamento. 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:

$$q_d = q_k \times \gamma_{Q1 [A2]} = 34.38 \text{ kPa} \times 1.3 = 44.69 \text{ kPa}.$$

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

	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA IZ04	LOTTO 40 R 26	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0000 002	REV. A

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

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

- Il carico da traffico ferroviario (q), assunto pari a 34.38 kPa, è moltiplicato per un coefficiente $\psi=0.2$ in accordo a Doc. Rif. [3] ed è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita applicata sulla stessa impronta dell'armamento. 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. [3]) che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:

$$q_d = 0.2q_k = 6.88 \text{ kPa.}$$

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	23 di 34

8. CALCOLO E RISULTATI

8.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

In accordo a quanto riportato nella Relazione Geotecnica (Doc. Rif. [1]) e sulla base di quanto descritto nel capitolo 4., nella Tabella 8.1 e Tabella 8.2 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 7.1 per i valori dei parametri geotecnici relativi ai materiali antropici utilizzati per il corpo del rilevato e per lo strato di scotico (50 cm al di sotto del rilevato). Il rilevato esistente viene modellato per semplicità con gli stessi parametri geotecnici del rilevato nuovo.

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

Tabella 8.1: Stratigrafia di calcolo

Strato	Profondità da [m da p.c.]	Profondità a [m da p.c.]	Descrizione
1	0	2.5	Depositi alluvionali costituiti da limi sabbiosi e/o limi sabbioso argillosi
2	2.5	13.5	Depositi alluvionali costituiti da ghiaie sabbioso limose
3	13.5	18.5	Depositi alluvionali costituiti da limi sabbiosi e/o limi sabbioso argillosi
4	18.5	>18.5	Depositi alluvionali costituiti da ghiaie sabbioso limose

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA IZ04	LOTTO 40 R 26	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0000 002	REV. A

Tabella 8.2: Parametri geotecnici di calcolo

STRATO	γ	ϕ'_k	ϕ'_d	c'_k	c'_d	c_u	c_u	$E_{op.}$	C_c	C_R	e_0	OCR	k
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m/s]
1	18	25	20.5	5	4	50	35.7	-	0.30	0.055	0.9	2.0	1.0E-08
2	19	35	29.3	0	0	-	-	20	-	-	-	-	1.0E-05
3	19	26	21.3	10	8	80	57.1		0.12	0.012	0.7	1.5	1.0E-08
4	19	35	29.3	0	0	-	-	30	-	-	-	-	1.0E-05

γ	Peso dell'unità di volume
ϕ'	Angolo di attrito
c'	Coesione efficace
c_u	Coesione non drenata
$E_{op.}$	Modulo di Young
C_c	Coefficiente di compressione
C_R	Coefficiente di ricomprensione
e_0	Indice dei vuoti
OCR	Grado di sovraconsolidazione
k	Permeabilità

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli ad una profondità di circa 4.0 m dal piano campagna per la valutazione dei cedimenti, in quanto i rilevati sono lontani dall'alveo di magra. Per le analisi di stabilità si considera comunque che la falda possa temporaneamente salire durante episodi di piena, quindi è stata presa a 1.0 m dal piano campagna per le condizioni statiche.

8.2 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 7.3.2.

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

$$K_H = + 0.092 \quad (\text{concorde alla direzione di scivolamento})$$

$$K_V = \pm 0.046 \quad (\text{verificando la più cautelativa tra negativo e positivo})$$

8.3 VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	25 di 34

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 a 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.

8.3.1 Risultati

I risultati ottenuti nelle analisi di stabilità globale sono riportati in Tabella 8.3 insieme alle figure di riferimento. Si noti come le superfici critiche rimangano all'interno del corpo del rilevato, quindi quelle che interessano la fondazione hanno coefficienti di sicurezza maggiori.

Tabella 8.3: Risultati verifiche di stabilità globale per la sezione al km 57+600

ANALISI	R/E_d	FIGURA DI RIFERIMENTO
STATICA (condizioni drenate)	1.159	Figura 8.1
STATICA (condizioni non drenate)	1.159	Figura 8.2
PSEUDOSTATICA	1.273	Figura 8.3

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

Name: Rilevato ferroviario
Unit Weight: 20 kN/m³
Cohesion: 0 kPa
Phi: 32 °

Name: 1
Unit Weight: 18 kN/m³
Cohesion: 4 kPa
Phi: 20.5 °

Name: 2
Unit Weight: 19 kN/m³
Cohesion: 0 kPa
Phi: 29.3 °

Name: 3
Unit Weight: 19 kN/m³
Cohesion: 8 kPa
Phi: 21.3 °

Name: 4
Unit Weight: 19 kN/m³
Cohesion: 0 kPa
Phi: 29.3 °

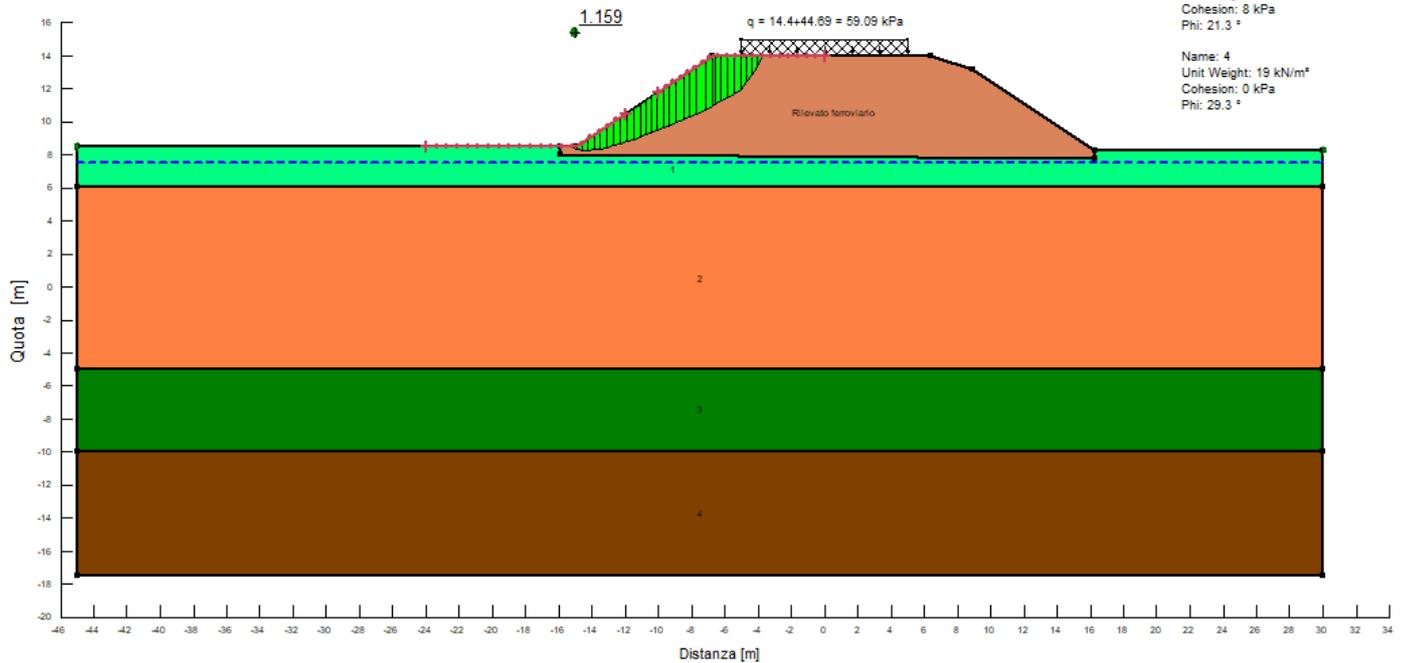


Figura 8.1: Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2. Condizioni drenate

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	27 di 34

Name: Rilevato ferroviario
Unit Weight: 20 kN/m³
Cohesion: 0 kPa
Phi: 32 °

Name: 1
Unit Weight: 18 kN/m³
Cohesion: 35.7 kPa

Name: 2
Unit Weight: 19 kN/m³
Cohesion: 0 kPa
Phi: 29.3 °

Name: 3
Unit Weight: 19 kN/m³
Cohesion: 57.1 kPa

Name: 4
Unit Weight: 19 kN/m³
Cohesion: 0 kPa
Phi: 29.3 °

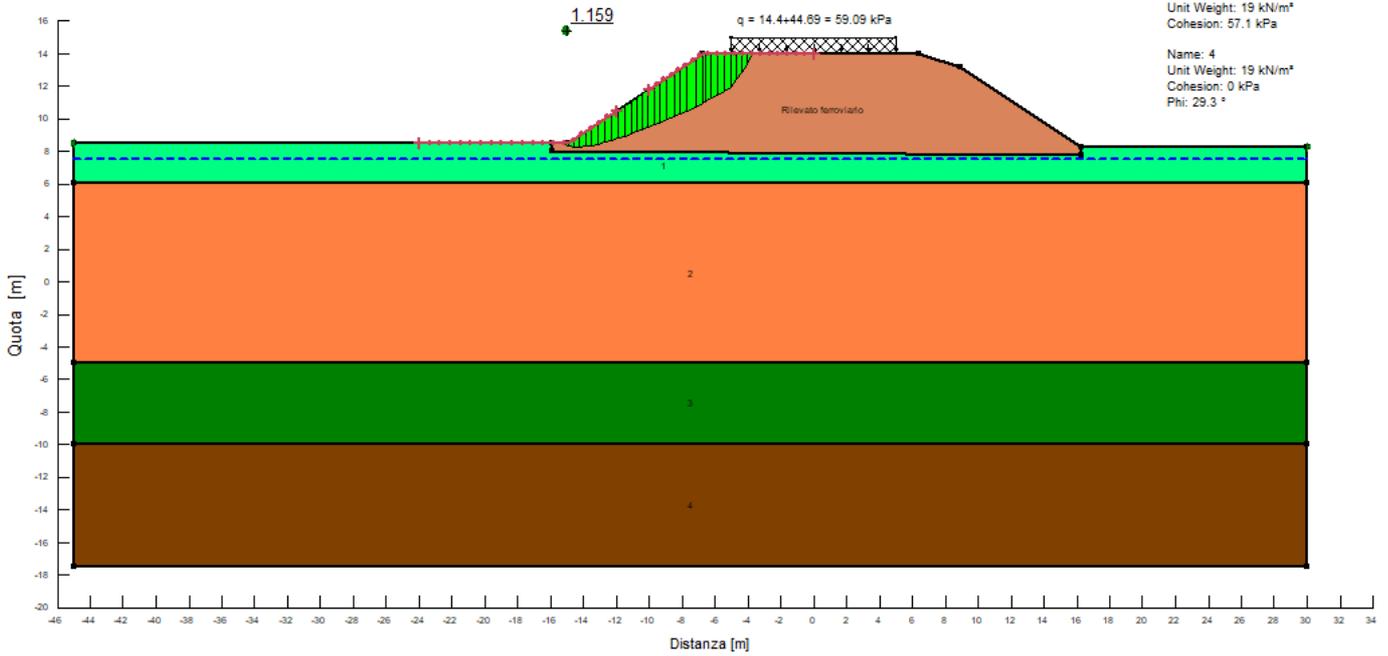


Figura 8.2: Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2. Condizioni non drenate

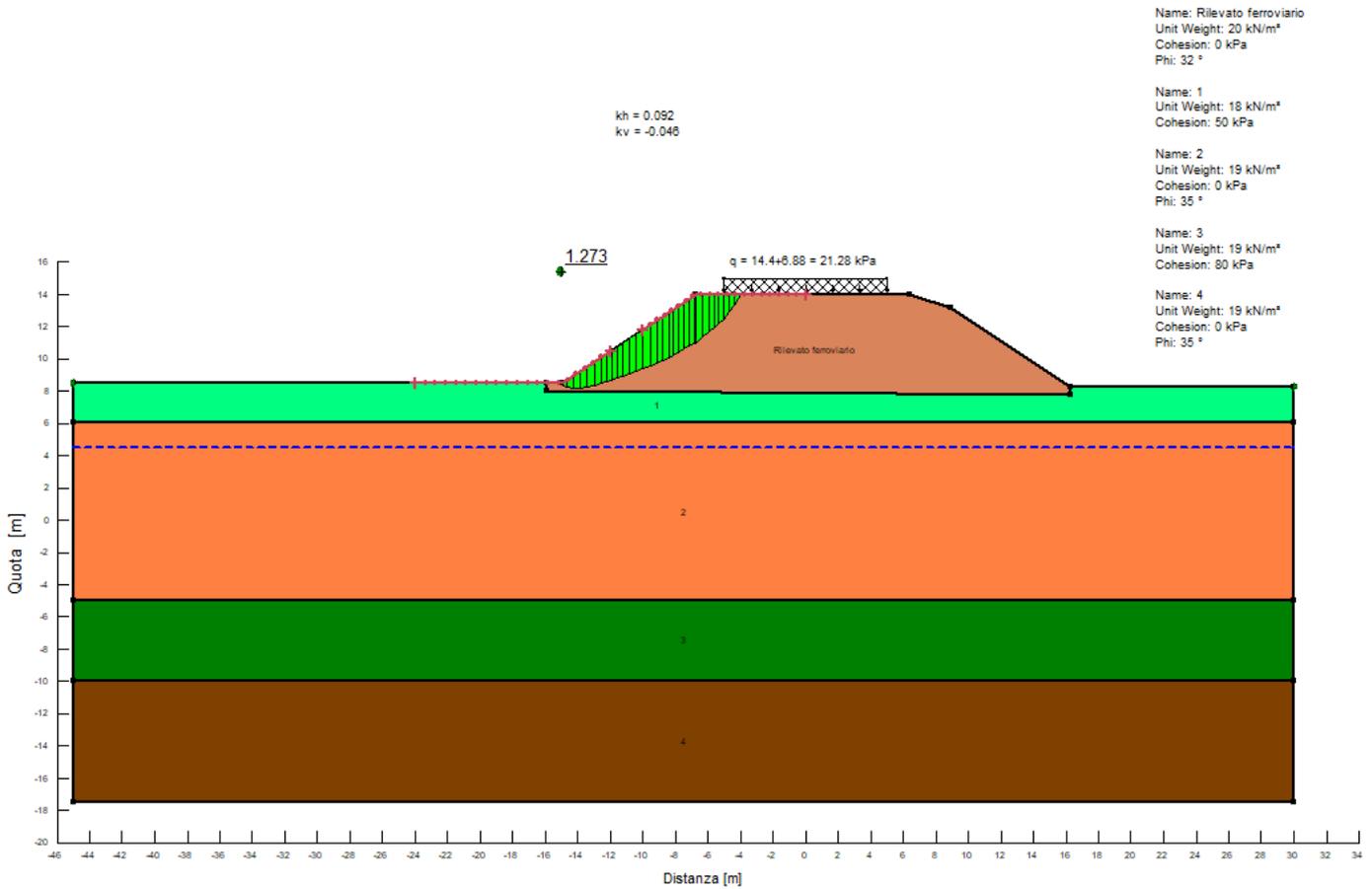


Figura 8.3: Analisi di stabilità globale in campo sismico. Condizioni non drenate

8.4 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

8.4.1 Modelli e fasi di calcolo

La sezione in esame fa riferimento alla condizione più critica, ovvero rilevato più alto in corrispondenza dell'approccio al viadotto.

L'altezza del rilevato in progetto è pari a circa 6.25 metri incluso il pacchetto di armamento ferroviario (supercompattato, sub ballast, ballast).

La stratigrafia di calcolo utilizzata ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici sono riportati in Tabella 8.1 e Tabella 8.2.

	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	IZ04	40 R 26	RH	GE0000 002	A	29 di 34

L'analisi viene condotta per mezzo di modello bi-dimensionale in cui è mostrato il rilevato in sezione, con la propria geometria ed eventuali sovraccarichi.

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

Al fine di rendere maggiormente chiare le fasi di costruzioni del rilevato ed i risultati delle analisi fatte, si in Figura 8.4 è riportato uno schema rappresentativo del modello considerato.

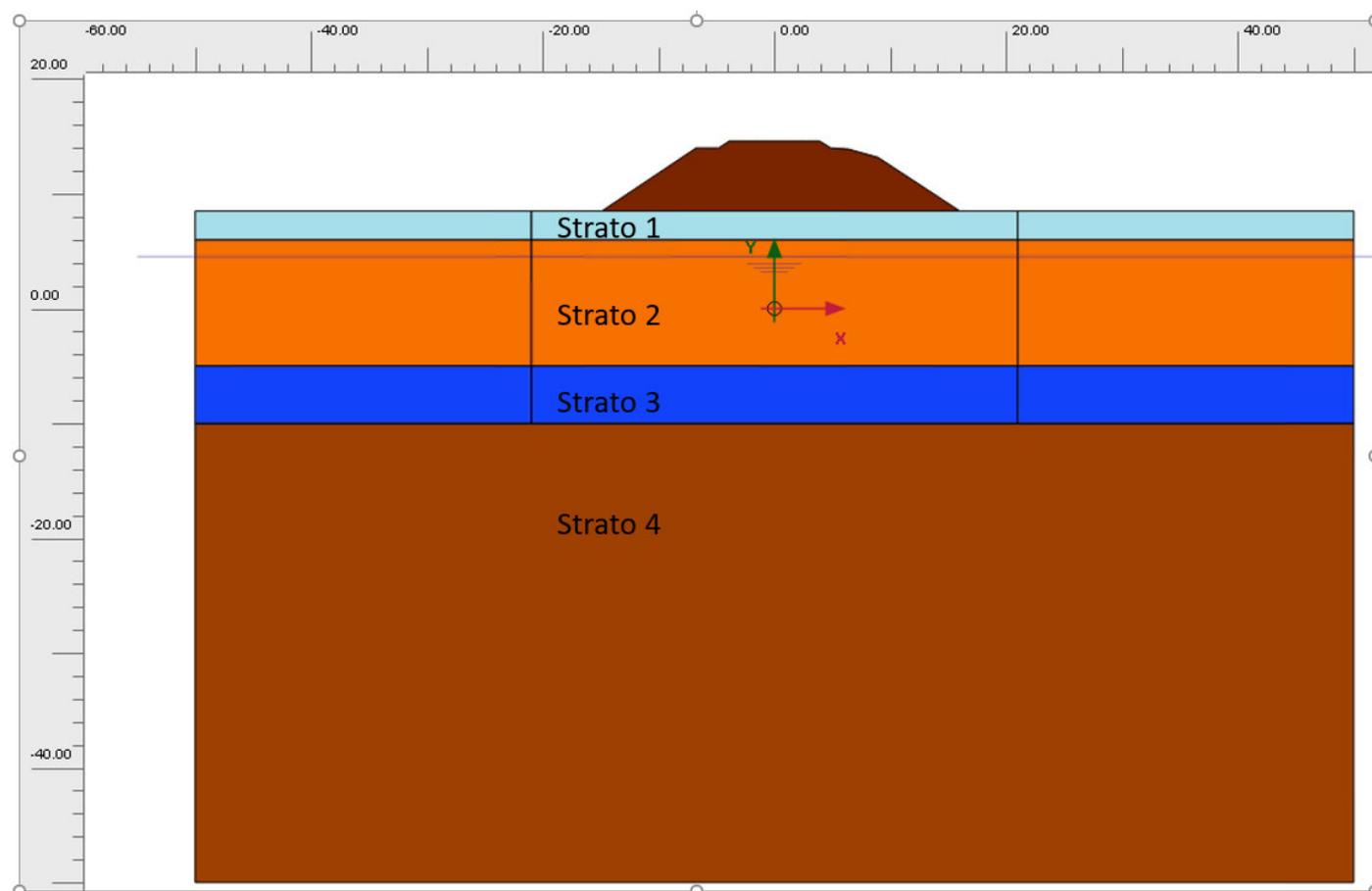


Figura 8.4: Schema rappresentativo sezione

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- Generazione dello stato tensionale iniziale geostatico;
- Azzeramento dei cedimenti e costruzione del rilevato di progetto per una durata di 4 mesi;

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO LINEA VENEZIA TRIESTE Posti di Movimento e Varianti di Tracciato Lotto 4: Variante Isonzo					
	Relazione di calcolo stabilità e cedimenti dei rilevati	COMMESSA IZ04	LOTTO 40 R 26	CODIFICA RH	DOCUMENTO GE0000 002	REV. A

- Consolidazione di 14 mesi fino alla messa in opera;
- Consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio della linea ferroviaria per una durata di 20 anni.

La mesh di calcolo utilizzata per le analisi è mostrata nella Figura 8.5.

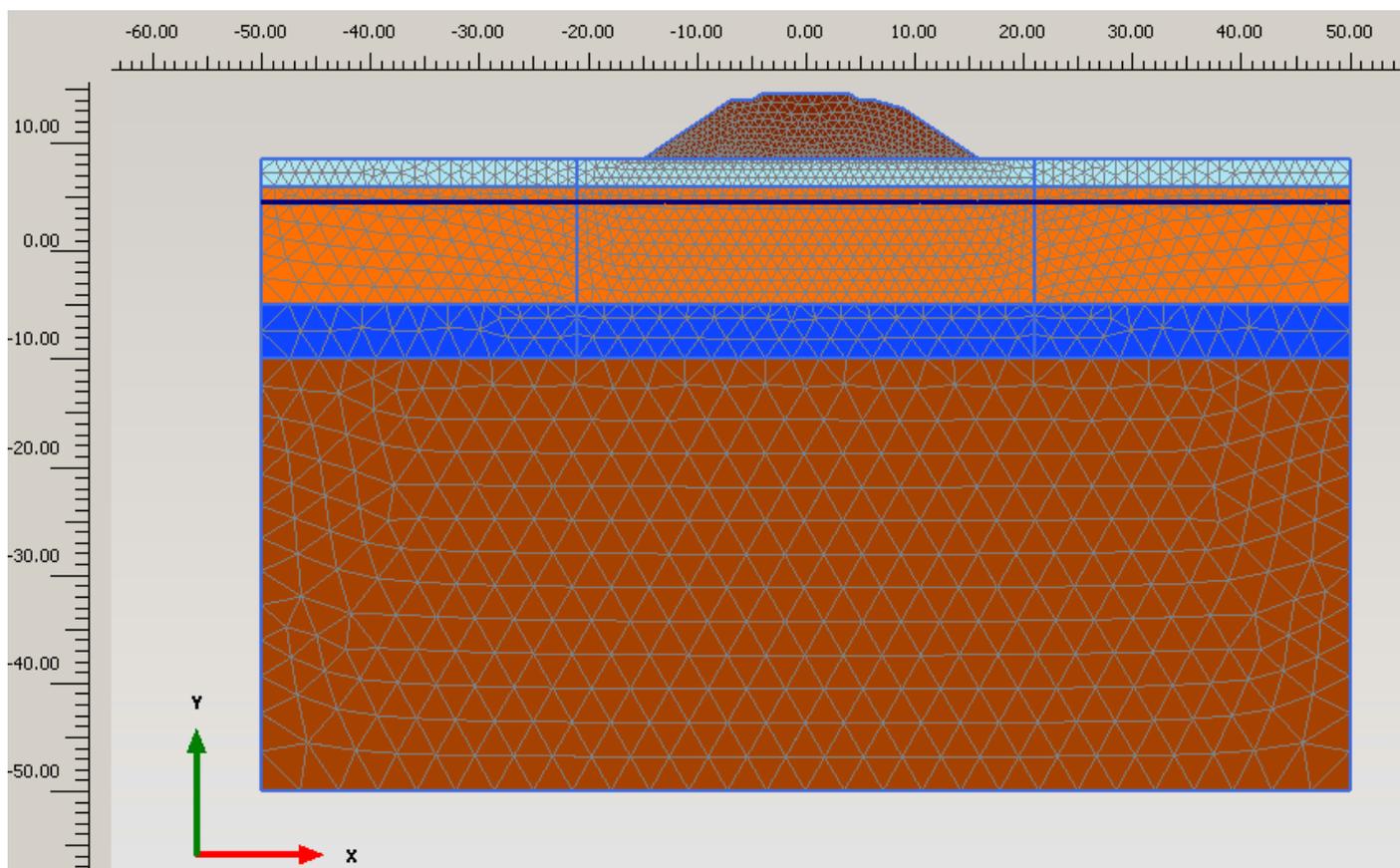


Figura 8.5: Modello rilevato

8.4.2 Risultati

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

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

- il cedimento differenziale fra le due rotaie del binario (livello trasversale) deve rispettare le limitazioni imposte dal documento “Standard di qualità geometrica del binario” con velocità fino a 300 km/h (Cod. RFI TCAR ST AR 01 001 D) e suoi allegati (Doc. Rif. [5]). Nel caso specifico non deve superare i 10 mm.

Nelle figure seguenti si riportano:

- Figura 8.6 e Figura 8.7: Campo di spostamenti verticali a fine costruzione e a lungo termine;
- Figura 8.8 e Figura 8.9: Sovrappressioni a fine costruzione e a lungo termine;

Si osserva che il cedimento a fine costruzione e a lungo termine sono uguali (poco superiori a 45 cm). Questo avviene data la forte presenza di materiali ghiaiosi ad alta permeabilità, fatto confermato dall’analisi delle sovrappressioni le quali già a fine costruzione risultano sostanzialmente nulle. In base a ciò, le verifiche di cui sopra si ritengono automaticamente soddisfatte.

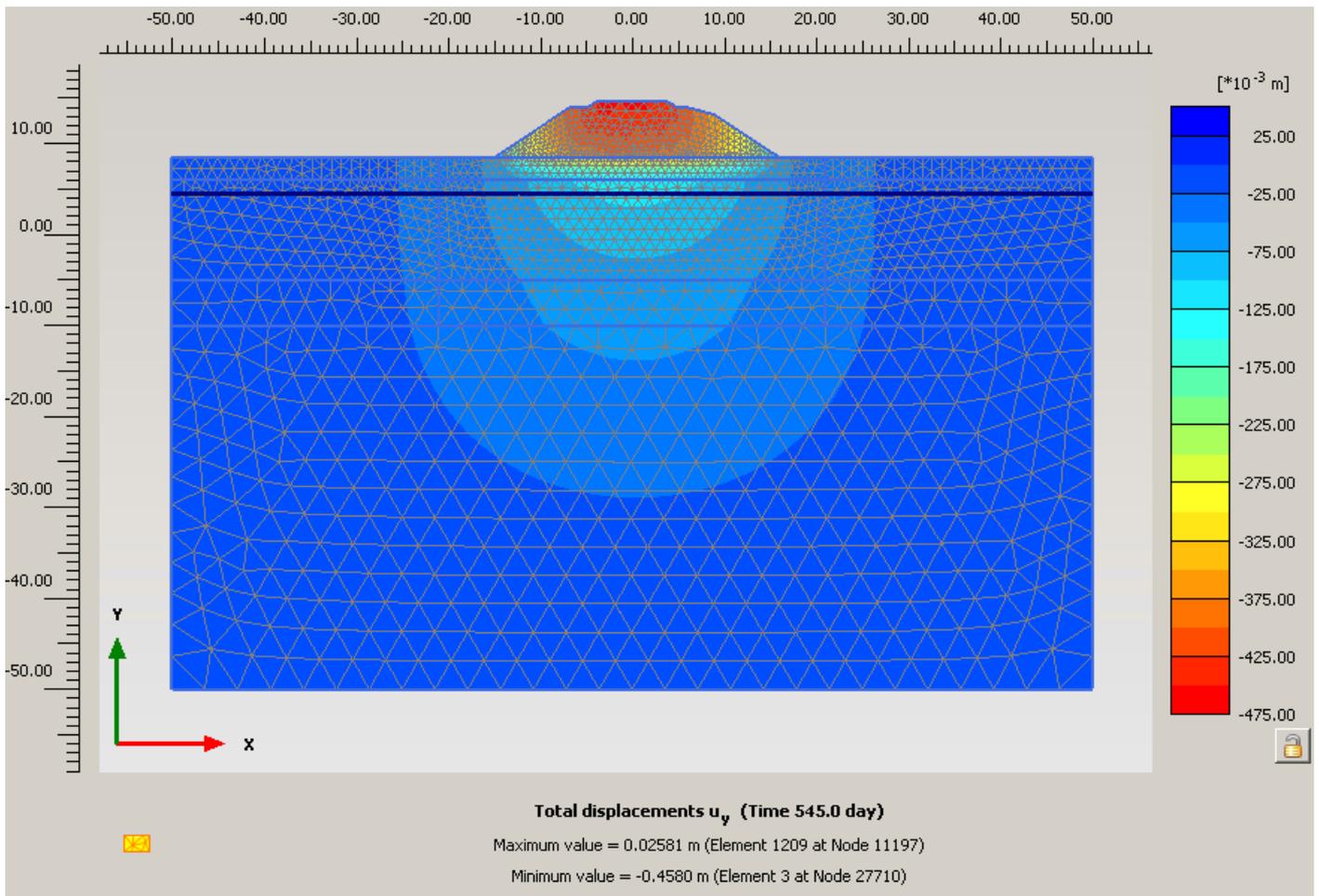


Figura 8.6: Spostamenti verticali termine costruzione

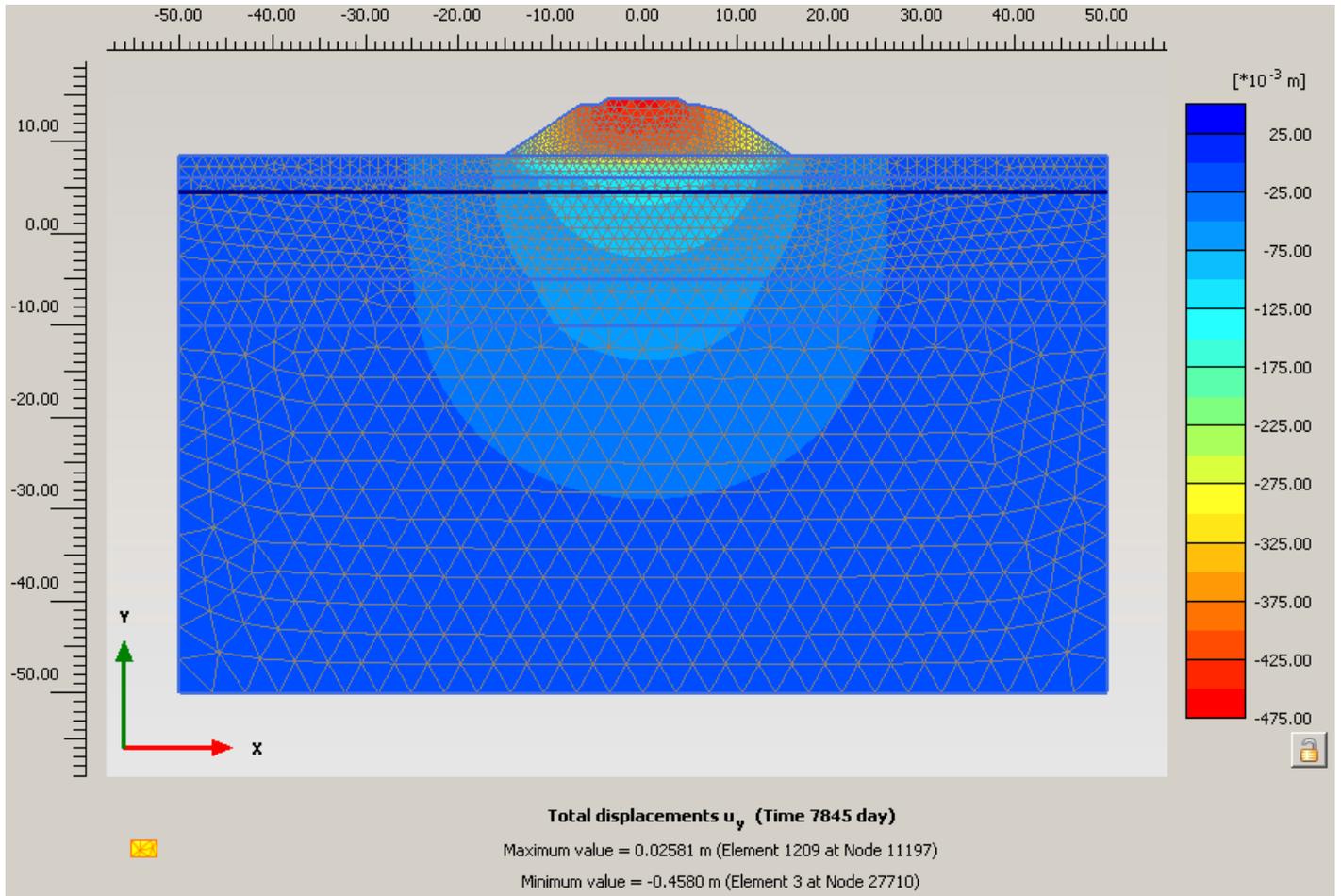


Figura 8.7: Spostamenti verticali lungo termine

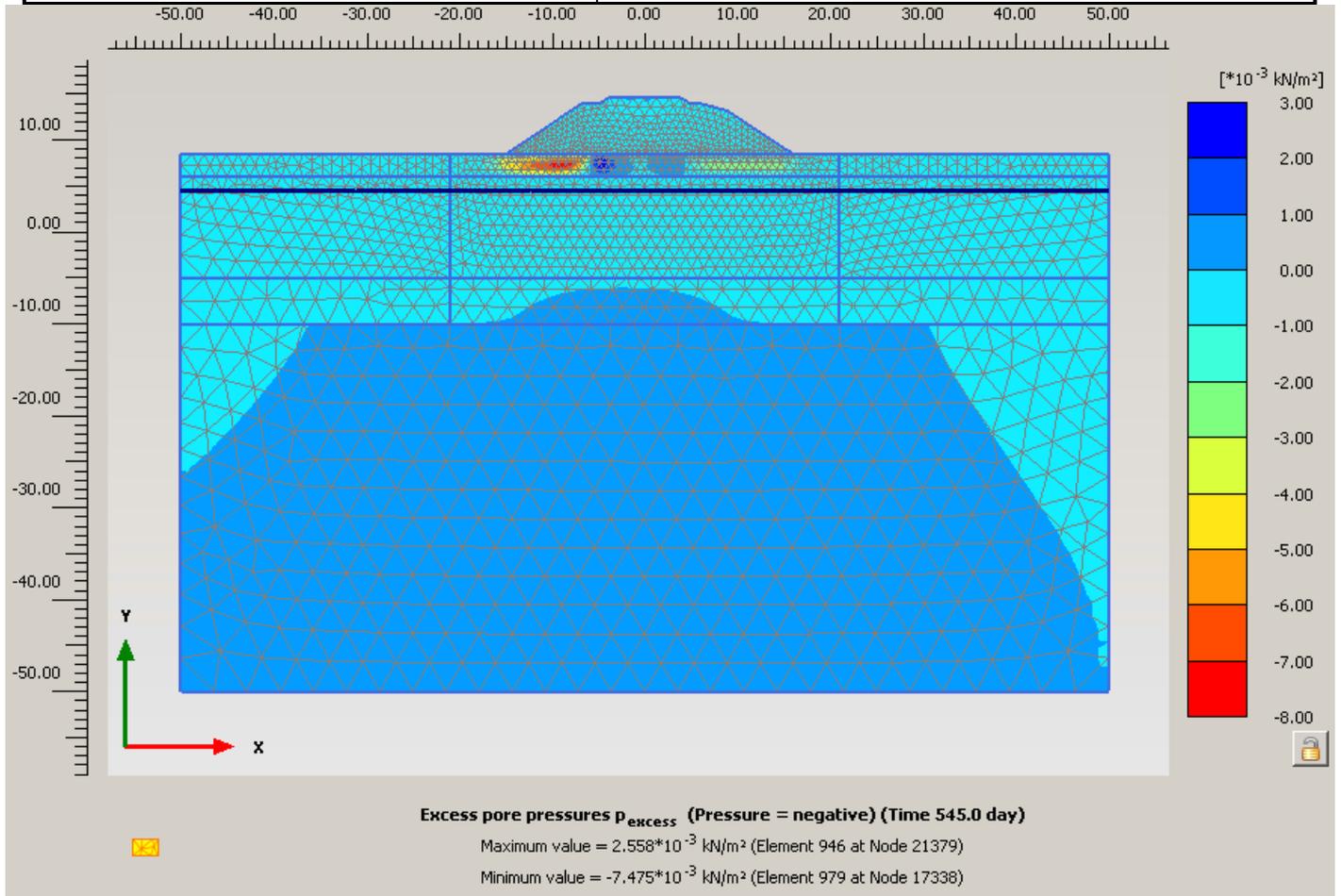


Figura 8.8: Sovrappressioni interstiziali Δu termine costruzione

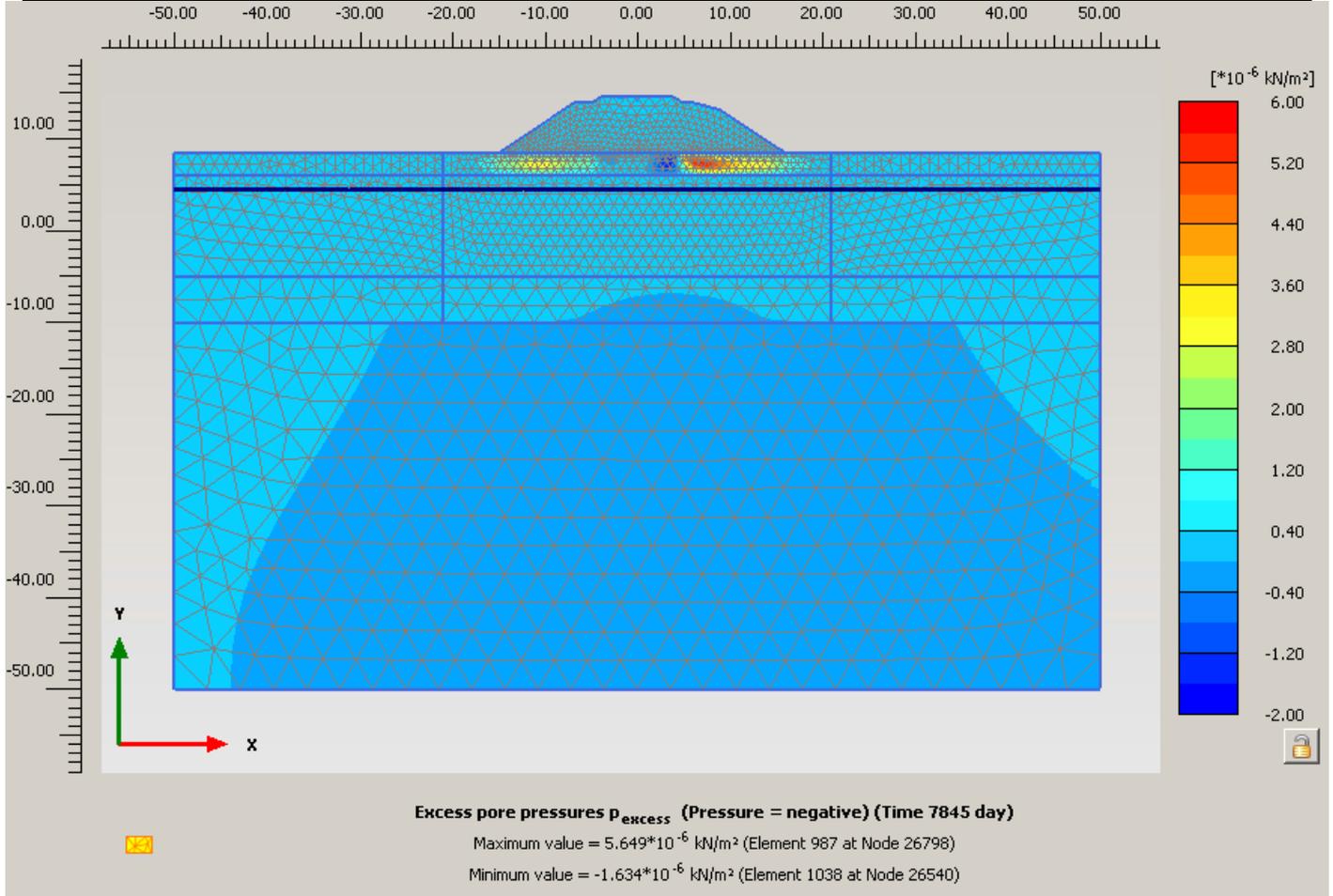


Figura 8.9: Sovrappressioni interstiziali Δu lungo termine