

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



**DIREZIONE TECNICA**

**U.O. COORDINAMENTO NO CAPTIVE E INGEGNERIA DI SISTEMA**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**NODO INTERMODALE DI BRINDISI**

**COLLEGAMENTO FERROVIARIO DELL'AEROPORTO DEL SALENTO CON LA STAZIONE DI BRINDISI**

**GEOTECNICA**

Relazione di calcolo dei rilevati stradali

SCALA:

-

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

I A 7 K 0 0 D 1 0 C L G E 0 0 0 6 0 0 2 C

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	L. Giannini	Dic.2019	A. Ciavarella	Dic.2019	T. Paoletti	Dic.2019	
B	EMISSIONE ESECUTIVA	L. Giannini	Dic.2019	A. Ciavarella	Dic.2019	T. Paoletti	Dic.2019	
C	EMISSIONE ESECUTIVA	L. Giannini	Feb. 2020	A. Ciavarella	Feb. 2020	T. Paoletti	Feb. 2020	

File:

n. Elab.: -

## INDICE

1. INTRODUZIONE.....	4
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	6
2.1 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO E DI BASE.....	6
2.2 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO.....	6
2.3 SOFTWARE.....	7
3. CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE .....	8
3.1 CRITERI GENERALI DI VERIFICA .....	8
3.2 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI.....	9
3.2.1 <i>Stati limite ultimi (SLU)</i> .....	9
3.2.2 <i>Stati limite di esercizio (SLE)</i> .....	11
3.3 STABILITÀ DEL SITO NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE .....	11
3.4 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI.....	12
3.4.1 <i>Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche</i> .....	12
3.4.2 <i>Stati limite ultimi (SLU)</i> .....	14
3.4.3 <i>Stati limite di esercizio (SLE)</i> .....	15
4. COEFFICIENTI SISMICI PER LA VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE .....	16
5. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA.....	17
5.1 CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI.....	17
5.1.1 <i>Slope/W</i> .....	17
5.1.2 <i>Plaxis 2D</i> .....	17
5.2 METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE .....	17
5.2.1 <i>Verifiche di stabilità</i> .....	17
5.2.2 <i>Valutazione degli spostamenti</i> .....	18
6. CARATTERISTICHE DEL CORPO STRADALE.....	20
6.1 DESCRIZIONE DEI RILEVATI STRADALI.....	20

6.2	MATERIALI COSTITUENTI IL RILEVATO .....	20
6.3	CARICHI DI PROGETTO .....	21
7.	SELEZIONE DELLE SEZIONI OGGETTO DI VERIFICA .....	22
8.	SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 00+265 NV02 SU SS16 (IV01) .....	23
8.1	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO .....	23
8.2	VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE .....	24
8.2.1	<i>Verifiche in condizioni statiche</i> .....	24
8.2.2	<i>Verifiche in condizioni pseudo-statiche</i> .....	25
8.3	VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI .....	29
8.3.1	<i>Modelli e fasi di calcolo</i> .....	29
8.3.2	<i>Risultati</i> .....	31
9.	SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 00+475 NV05 SU SC76 (IV02) .....	39
9.1	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO .....	39
9.2	VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI .....	40
9.2.1	<i>Modelli e fasi di calcolo</i> .....	40
9.2.2	<i>Risultati</i> .....	42
10.	SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 00+325 NV05 SU SC76 (IV02) .....	49
10.1	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO .....	49
10.2	VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE .....	49
10.2.1	<i>Verifiche in condizioni statiche</i> .....	49
10.2.2	<i>Verifiche in condizioni pseudo-statiche</i> .....	50
10.3	VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI .....	54
10.3.1	<i>Modelli e fasi di calcolo</i> .....	54
10.3.2	<i>Risultati</i> .....	56

	<b>NODO INTERMODALE DI BRINDISI COLLEGAMENTO FERROVIARIO DELL'AEROPORTO DEL SALENTO CON LA STAZIONE DI BRINDISI PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE</b>	COMMESSA IA7K	LOTTO 00 D10	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. C	FOGLIO 4 di 63

## 1. INTRODUZIONE

Il presente documento riporta le verifiche, ai sensi della Normativa vigente (NTC 2018), relative ai rilevati delle viabilità incluse nel progetto del nuovo collegamento ferroviario fra la stazione di Brindisi e la futura stazione dell'aeroporto del Salento.

In particolare, le verifiche sono relative ai rilevati stradali delle due viabilità interferite SS16 e SC n. 76 corrispondenti alle WBS di progetto NV02 e NV05. Per rendere compatibili le due viabilità esistenti con la presenza del nuovo collegamento ferroviario, esse sono state modificate almetricamente realizzando lo scavalco della sede ferroviaria con due cavalcaferrovia (IV01 e IV02).

L'area interessata dall'intervento ricade a nord e nord-ovest della città di Brindisi ed è compresa tra l'asse ferroviario della linea Adriatica e l'aeroporto. Il progetto è comprensivo anche dei raccordi con le tratte ferroviarie direzione Taranto-Brindisi e Bari-Brindisi (Figura 1).

Il documento è così articolato:

Nel Capitolo 2 si riportano i documenti di riferimento e la normativa citati nel testo.

Nel Capitolo 3 si descrivono i criteri generali di progettazione in accordo alla Normativa vigente (NTC II documento è così articolato:

Nel Capitolo 2 si riportano i documenti di riferimento e la normativa citati nel testo.

Nel Capitolo 3 si descrivono i criteri generali di progettazione in accordo alla Normativa vigente (NTC 2018)

Nel Capitolo 4 si definisce l'azione sismica di progetto e la valutazione del sito nei confronti della liquefazione.

Nel Capitolo 5 si descrivono i codici di calcolo ed i criteri di verifica adottati.

Nel Capitolo 6 si riporta la descrizione del corpo stradale in esame da un punto di vista geometrico, le caratteristiche geotecniche dei materiali costituenti il rilevato e i sovraccarichi presenti.

Nel Capitolo 7 si definiscono le sezioni rappresentative delle condizioni maggiormente critiche.

Nel Capitolo 8 si riportano i risultati delle analisi effettuate.



Figura 1: Tracciato di progetto con ubicazione opere principali - Google Earth, immagini 2018

## 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 – Progetto Definitivo – Collegamento ferroviario dell'aeroporto del Salento con la stazione di Brindisi – Relazione geotecnica generale (Doc. Rif. - IA7K00D10GEGE0006001)
- [2] ITALFERR – Progetto Definitivo – Collegamento ferroviario dell'aeroporto del Salento con la stazione di Brindisi – Profili geotecnici (Doc.da IA7K00D10F6GE0006001A a IA7K00D10F6GE0006005)
- [3] ITALFERR – Progetto Definitivo – Collegamento ferroviario dell'aeroporto del Salento con la stazione di Brindisi – Sezioni geotecniche delle viabilità SS16 e SC n.76 (Doc.IA7K00D10FZGE0006001 e IA7K00D10FZGE0006002)

### 2.2 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO

Si riporta di seguito l'elenco delle normative a cui si è fatto riferimento per la stesura della presente relazione:

- [4] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: "Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni", G.U. n.29 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.30.
- [5] 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"
- [6] RFI DTC SI MA IFS 001 C del 21.12.2018- "MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI".
- [7] RFI DTC SI SP IFS 001 C del 21.12.2018- Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Parte II – Sezione 5 – "Opere in terra e scavi"– RFI.
- [8] 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.

### 2.3 SOFTWARE

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

[11] 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))

### 3. CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE

#### 3.1 CRITERI GENERALI DI VERIFICA

Per le opere in esame devono essere svolte le seguenti verifiche di sicurezza e delle prestazioni attese (par. 6.2.3. del Doc. Rif. [4]):

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

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

$$E_d \leq R_d \quad (\text{Eq. 6.2.1 del Doc. Rif. [4]})$$

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.[4]).

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

$$E_d \leq C_d \quad (\text{Eq. 6.2.7 del Doc. Rif. [4]})$$

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.



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

In base a quanto indicato dalle NTC 2018 le verifiche di sicurezza che devono essere condotte per opere costituite da materiali sciolti sono le seguenti.

#### 3.2.1 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.[4]):

Approccio 1:

Combinazione 2 : A2 + M2 + R2

tenendo conto dei coefficienti parziali sotto definiti.

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 resistenza globale del sistema (Par. C.6.8.6.2 del Doc. Rif.[5]), calcolata sulla base delle azioni di progetto, dei parametri di progetto e della geometria di progetto ( $R = R \left[ \gamma_F \cdot F_{k_i}; \frac{X_k}{\gamma_m}; a_d \right]$ ).

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 Doc Rif. [6], per le verifiche agli stati limite ultimi si adottano i valori dei coefficienti parziali in Tabella 1 (Tab. 6.2.I del Doc Rif. [4])

Tabella 1: Coefficienti parziali sulle azioni (Tab. 6.2.I del Doc. Rif.[4])

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

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

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

In (Tab. 6.2.I del Doc. Rif. [4]) il significato dei simboli è il seguente:

- $\gamma_{G1}$  coefficiente parziale del peso proprio della struttura, del terreno e dell'acqua, quando pertinente;
- $\gamma_{G2}$  coefficiente parziale dei pesi propri degli elementi non strutturali;
- $\gamma_{Qi}$  coefficiente parziale delle azioni variabili.


 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>NODO INTERMODALE DI BRINDISI          COLLEGAMENTO FERROVIARIO DELL'AEROPORTO DEL          SALENTO CON LA STAZIONE DI BRINDISI          PROGETTO DEFINITIVO</b>					
	<b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE          FERROVIARIE</b>	COMMESSA IA7K	LOTTO 00 D10	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. C

Tabella 2: Coefficienti parziali sui terreni (M1 ed M2) - (Tab. 6.2.II, del Doc. Rif.[4])

PARAMETRO	Coefficiente parziale	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\gamma_{\varphi'}$	1.0	1.25
Coesione efficace	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
Resistenza non drenata	$\gamma_{Cu}$	1.0	1.4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_{\gamma}$	1.0	1.0

Tabella 3: Coefficienti parziali per le verifiche di stabilità globale (R2) - (Tab. 6.8.I, Doc. Rif. [4])

Coefficiente parziale	(R2)
$\gamma_R$	1.1

### 3.2.2 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. [4]), 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.

Nello specifico, come riportato nei Doc. Rif. [6], RFI stabilisce, per i rilevati ferroviari, un valore soglia degli spostamenti residui attesi, corrispondenti ad uno Stato Limite di Esercizio ( $s_{SLE}$ ), pari a 5 cm. Inoltre, il cedimento residuo deve essere inferiore al 10% del cedimento di lungo termine; in questa sede, trattandosi di rilevati stradali, si fa riferimento solo al primo criterio enunciato.

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

### 3.3 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.

Per il presente progetto, sulla base dei valori di pericolosità sismica determinati (Doc. Rif. [1]), la verifica a liquefazione può essere omessa, poiché per tutto il tracciato non sono attese accelerazioni massime superiori a 0.1g.

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

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

Le NTC 2018 (Doc. Rif. [4]) 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. [4]:

- **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.
- **Stati Limite Ultimi (SLU):**

1. Stato Limite di Salvaguardia della Vita umana, **SLV**, definito come lo stato limite in cui la struttura subisce una significativa perdita della rigidezza nei confronti dei carichi orizzontali ma non nei confronti dei carichi verticali. Permane un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali.
2. 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 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.[5]).

Tabella 4: Verifiche di sicurezza in funzione della Classe d'uso (Tab. C7.3.I, Doc. Rif.[5])

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.[5], 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.

### 3.4.2 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. [4]). 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 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. [4]). 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. [4] le verifiche possono essere condotte mediante metodi pseudo statici, metodi degli spostamenti e metodi di analisi dinamica.

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

Per tale stato limite 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**).

#### 4. COEFFICIENTI SISMICI PER LA VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE

Come descritto al Par. C7.11.4 del Doc. Rif. [5] , la verifica di stabilità globale va condotta mediante il metodo di analisi definito al Par. 7.11.3.5 del Doc. Rif.[4], inerente alla stabilità dei pendii.

Sulla base di quanto definito al Par.7.11.3.5.2 del Doc. Rif.[4], in mancanza di studi specifici, i coefficienti sismici  $k_h$  (orizzontale) e  $k_v$  (verticale) sono definiti come:

$$k_h = \beta_s a_{max}/g$$

$$k_v = \pm k_h / 2$$

essendo:

$a_{max}$  = azione sismica di progetto definita nella Relazione geotecnica (Doc. Rif. [1]), qui assunto pari a 0.084 per il Rilevato di approccio al cavalcaferrovia IV01 sulla SS16 e 0.067 per il Rilevato di approccio al cavalcaferrovia IV02 sulla Strada Comunale 76

$\beta_s$  = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.


Come chiarito al Par. 7.11.4 del Doc. Rif. [4] il valore del coefficiente  $\beta_s$  da assumere è pari a 0.38 per verifiche allo SLV su fronti di scavo o rilevati, come nel caso in oggetto.

In accordo alle espressioni di cui sopra, si ottengono i seguenti coefficienti per la verifica di stabilità globale allo SLV (Tabella 5):

Tabella 5: Valori dei coefficienti sismici per le verifiche di stabilità globale

$a_{max}$ (g)	$k_h$	$k_v$
0.084	0.032	$\pm 0.016$
0.067	0.026	$\pm 0.013$



 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>NODO INTERMODALE DI BRINDISI COLLEGAMENTO FERROVIARIO DELL'AEROPORTO DEL SALENTO CON LA STAZIONE DI BRINDISI PROGETTO DEFINITIVO</b></p>					
<p><b>RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE FERROVIARIE</b></p>	<p>COMMESSA IA7K</p>	<p>LOTTO 00 D10</p>	<p>CODIFICA CL</p>	<p>DOCUMENTO GE0006 002</p>	<p>REV. C</p>	<p>FOGLIO 17 di 63</p>

## 5. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA

### 5.1 CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI

#### 5.1.1 *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 idrostratigrafiche 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.

#### 5.1.2 *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*.

### 5.2 METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE

#### 5.2.1 *Verifiche di stabilità*

L'esame delle condizioni di stabilità dei rilevati è stato condotto utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite.

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

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

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

Nelle analisi sono state escluse, perché considerate non significative, le superfici di rottura corticali (con profondità minori di 1m ca.). 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 delle scarpate con terreno vegetale e inerbimento darà necessariamente, in termini di coesione efficace, allo strato più superficiale del corpo del rilevato, né il pacchetto di pavimentazione stradale che contribuisce anch'esso ad incrementare la resistenza allo scivolamento nella porzione di meccanismo che attraversa tali materiali.

### **5.2.2 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 implementato nel codice di calcolo di tipo elasto-plastico con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb per i terreni naturali e un modello elasto-plastico per il materiale costituente il rilevato.

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

I parametri adottati nel calcolo sono quelli riportati al paragrafo relativo.

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 impermeabile lungo il bordo orizzontale.

Stante la natura dei materiali coesivi incontrati, e considerata dunque la possibilità di sviluppo di cedimenti secondari non trascurabili, ai cedimenti calcolati con il modello ad elementi finiti Plaxis sono poi aggiunti i contributi dovuti alla consolidazione secondaria.

Tale contributo è stato valutato tenendo conto degli incrementi tensionali indotti dalla realizzazione del rilevato e dalla successiva applicazione dei sovraccarichi..

Per il calcolo dei cedimenti secondari è stato utilizzato il valore del coefficiente  $C_{\alpha\varepsilon}$  riportato nella tabella dei parametri di calcolo. Il calcolo avviene per mezzo della seguente equazione:

$$s_s = \sum_1^n \log \left( \frac{t}{t_{100,i}} \right) \cdot c_{\alpha\varepsilon,i} \cdot h_i$$

essendo:

$s_s$  = cedimento secondario (m);

$t$  = tempo generico a partire dall'applicazione del carico (s);

$t_{100,i}$  = tempo necessario all'esaurimento della consolidazione primaria nello strato i-esimo interessato da consolidazione secondaria (s);

$h_i$  = altezza dello strato i-esimo di terreno interessato da consolidazione secondaria (m);

$n$  = numero di strati di terreno interessato da consolidazione secondaria (-);

$C_{\alpha\varepsilon,t}$  = coefficiente di consolidazione secondaria nello strato i-esimo misurato da prove edometriche di laboratorio

## 6. CARATTERISTICHE DEL CORPO STRADALE

### 6.1 DESCRIZIONE DEI RILEVATI STRADALI

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, laddove l'altezza dei rilevati superi 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. Per le scarpate è stata ipotizzata una finitura con terreno vegetale e inerbimento.

Il rilevato è finito in sommità con la realizzazione di un pacchetto stradale di pavimentazione.

### 6.2 MATERIALI COSTITUENTI IL RILEVATO

Il materiale costituente il copro del rilevato sarà materiale a grana grossa con i valori minimi dei parametri caratteristici riportati in Tabella 6.

L'inerbimento superficiale delle scarpate non è stato considerato nelle analisi.

*Tabella 6: Parametri geotecnici di calcolo – materiali costituenti il rilevato*

STRATO	Spessore	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Modulo di Young operativo	Permeabilità
	[m]	$\gamma_d$	$\phi'_k$	$\phi'_d$ M2	$c'_k$	$c'_d$ M2	$E_{op.}$	$k$
		[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[m/s]
RILEVATO	Variabile	19	35	29*.3	0	0	40	1x10 <sup>-5</sup>
STRATO DI SCOTICO	0.5	19	35	29.3	0	0	20	1x10 <sup>-5</sup>

### 6.3 CARICHI DI PROGETTO

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

- Carico rappresentativo del traffico stradale
- Carico da azione sismica.

Il traffico stradale è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 20 kPa. Il carico è stato applicato sulla sommità del rilevato per una larghezza complessiva di circa 8.0 m.

Per la definizione dell'azione sismica di progetto si rimanda al capitolo 4 del presente documento.

Tali carichi e sovraccarichi sono stati inseriti nelle diverse verifiche agli SLU (statiche e sismiche) e agli SLE applicando, laddove necessario, gli opportuni coefficienti parziali di amplificazione come previsti dalla Normativa vigente.

## 7. SELEZIONE DELLE SEZIONI OGGETTO DI VERIFICA

I rilevati oggetto di studio sono relativi agli adeguamenti altimetrici delle viabilità SC. N 76 (NV05) e SS 16 (NV02).

Sono state selezionate le seguenti sezioni rappresentative delle condizioni maggiormente critiche:

- Sez. km 00+265 NV02 su SS16, rilevato H=8m.
- Sez. km 00+325 NV05 su SCn16, rilevato H=9.5m.
- Sez. km 00+475 NV05 su SCn16, rilevato con "muro ad U" H=9m.

Per le sezioni sopra selezionate sono state svolte le verifiche di stabilità globale e verifiche dei cedimenti, eccezion fatta per la sezione con muri ad U di NV05 per cui è stata effettuata la sola verifica dei cedimenti.

Nel seguito sono riportate le verifiche relative alla sezione individuata per la quale è stata definita la stratigrafia di riferimento ed i relativi parametri geotecnici di progetto, per la cui definizione si rimanda alla Relazione Geotecnica (Doc. Rif. [1]).

## 8. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 00+265 NV02 SU SS16 (IV01)

La sezione oggetto di verifica, ubicata alla progressiva 00+265 della SS16 (NV02) è costituita da un rilevato di altezza pari a 8 metri.

### 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 Cap. 3, nella Tabella 7 e Tabella 8 sono riportati la stratigrafia ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto, fattorizzati utilizzando i coefficienti M2 contenuti nella Tabella 2 della presente relazione.

Si rimanda invece alla Tabella 6 per i valori dei parametri geotecnici relativi ai materiali antropici utilizzati per il corpo del rilevato e per lo strato di scotico (50 cm al di sotto del rilevato).

Si ricorda che, come definito al Cap. 7 del Doc. Rif.[4], 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 7: Stratigrafia di calcolo per la sezione 00+265 NV02\_SS16

Strato	Profondità da [m da p.c.]	Profondità a [m da p.c.]	Descrizione
Ls(ms)	0	1	Limo marrone scuro
S <sub>L</sub> (Cal)	1	14	Sabbia limosa/limo sabbioso color avana con possibili intercalazioni calcarenitiche
Ls(ga)	14	17.5	Limo sabbioso grigio azzurro
Al	17.5	40	Argilla limosa grigio azzurra
Cal	40	50	Depositi calcarenitici

Tabella 8: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 00+265 NV02\_SS16 – Materiali in sito

STRATO	Descrizione strato	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Resistenza al taglio non drenata		Modulo di Young operativo	Permeabilità	Coefficiente di consolidazione secondaria
		$\gamma_d$	$\phi'_k$	$\phi'_d$	$c'_k$	$c'_d$	$c_u$	$c_u$	$E_{op.}$	$k$	$C_{\alpha s}$
		[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[m/s]	[-]
Ls(ms)	Limo marrone	19	26	21.3	5	4	-	-	10	1.0E-08	-

	scuro										
St(Cal)	Sabbia limosa/limo sabbioso color avana con possibili intercalazioni calcarenitiche	19	29	23.9	3	2.4	-	-	20 (prof< 4.5m) 24 (prof> 4.5m)	1.0E-07	-
Ls(ga)	Limo sabbioso grigio azzurro	19.5	26	21.3	7	5.6	50	35.7	33	1.0E-07	-
Al	Argilla limosa grigio azzurra	20	23	18.8	15	12	0.3·sv	0.3·sv/1.4	(2.5·G <sub>0</sub> )/10	1.0E-09	0.0012
Cal	Depositi calcarenitici	20	31	25.7	0	0	-	-	30	1.0E-07	-

Dove:  $G_0 = 85 \cdot (\sigma'_{v0}/p_a)^{0.65}$  (assumendo la falda a 2 m da pc)

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli ad una quota di 2.0 m dal piano campagna.

## 8.2 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. [10]). 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. Tali coefficienti sono contenuti nella Tabella 1 e nella Tabella 2 della presente relazione.

Come da NTC 2018 (Doc. Rif. [4]), la verifica SLU di stabilità globale è soddisfatta se la relazione:

$$FS \geq R2 = 1.1$$

è verificata in condizioni statiche e la relazione:

$$FS \geq R2 = 1.2$$

È verificata in condizioni sismiche.

Il coefficiente R2 è contenuto nella Tabella 3 della presente relazione.

### 8.2.1 Verifiche in condizioni statiche

L'analisi di stabilità globale in campo statico è stata condotta in accordo alla combinazione DA1C2 assumendo i parametri geotecnici M2 di cui in [4] in Tabella 8 e Tabella 6 rispettivamente per i materiali in sito e per i materiali antropici.



Il traffico stradale è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 20 kPa. Il carico è stato applicato sulla sommità del rilevato per una larghezza complessiva di circa 8.0 m. Tale carico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico moltiplicato per 1.3.

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico stradale. Tra esse, è definita critica quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo.

Si sottolinea che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e che non interessano la sede stradale.

In Figura 2, sono riportate le superfici di rottura critica per la combinazione DA1C2; il fattore di sicurezza FS relativo a tali meccanismi, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS^{MIN} (DA1C2) = 1.196$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS^{MIN} \geq R2 = 1.1,$$

la verifica di stabilità globale in campo statico risulta soddisfatta.

### **8.2.2 Verifiche in condizioni pseudo-statiche**

L'analisi di stabilità globale in campo sismico è stata condotta assumendo i parametri geotecnici caratteristici di cui in [4] in Tabella 8 e Tabella 6 rispettivamente per i materiali in sito e per i materiali antropici.

In accordo a quanto riportato al punto 4, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$$K_H = + 0.032 \quad (\text{concorde alla direzione di scivolamento})$$

$$K_V = \pm 0.016 \quad (\text{verificando la più cautelativa tra negativo e positivo})$$

Il traffico stradale è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 20 kPa. Il carico è stato applicato sulla sommità del rilevato per una larghezza complessiva di circa 9.5 m. Tale carico 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. [4]) che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:  $q_d = q_k = 20$  kPa.

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico stradale. Tra esse, è definita "critica", quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo.

Si sottolinea che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e che non interessano la sede stradale.

In Figura 3 è riportata la superficie di rottura critica; il fattore di sicurezza FS relativo a tale meccanismo, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS^{\text{MIN}}=1.429$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS^{\text{MIN}} \geq R2 = 1.2,$$

la verifica di stabilità globale in campo sismico risulta soddisfatta.

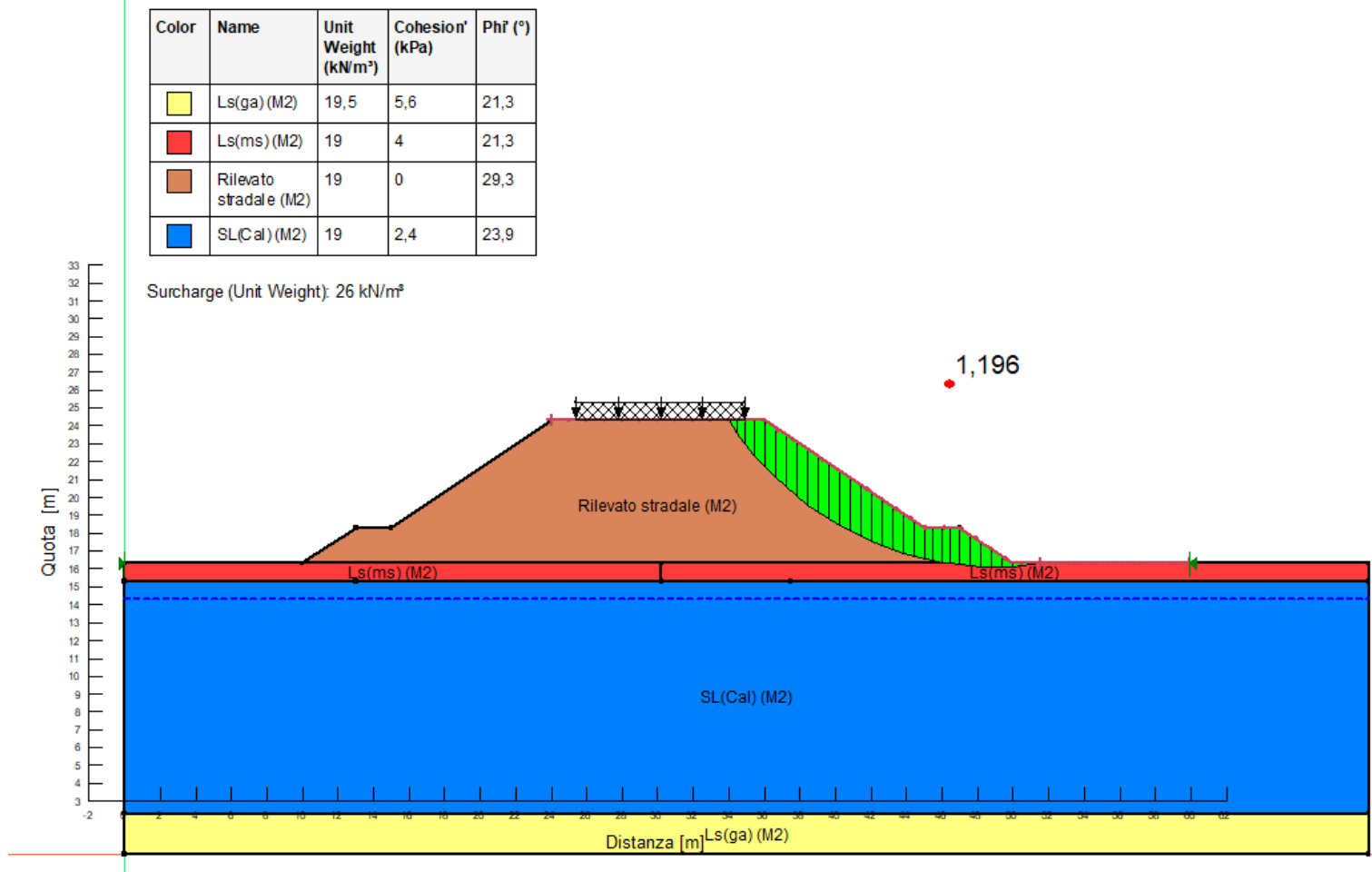


Figura 2: Rilevato H=8.00 m, Sezione 00+265 NV02\_SS16- Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2

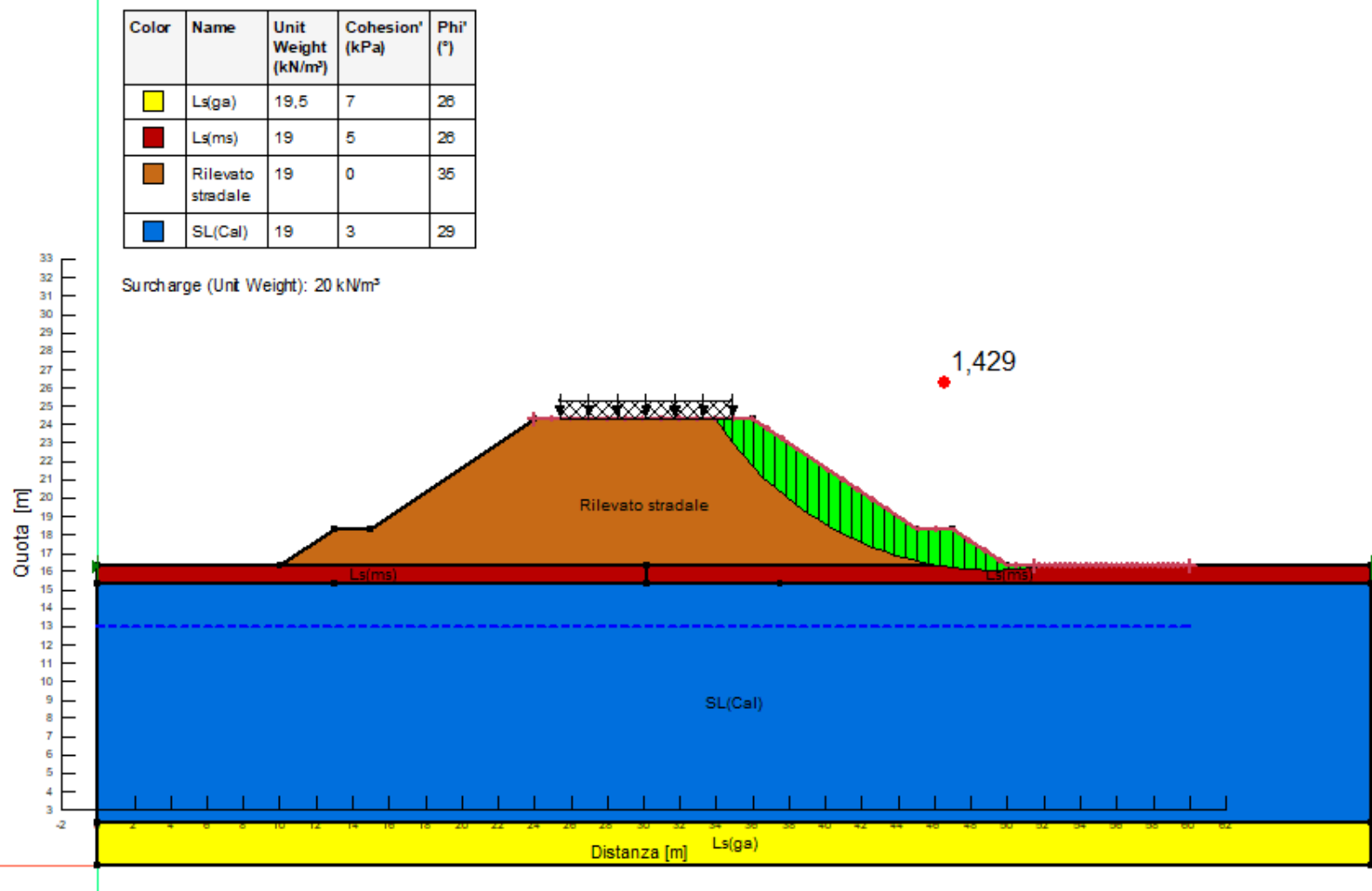


Figura 3: Rilevato H=8.00 m, Sezione 00+265 NV02\_SS16- Analisi di stabilità globale in campo sismico

### **8.3 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI**

#### **8.3.1 Modelli e fasi di calcolo**

Il modello utilizzato per queste analisi è mostrato nella Figura 4.

La stratigrafia di calcolo utilizzata è riportata in Tabella 7 utilizzando i parametri caratteristici riportati in Tabella 8.

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

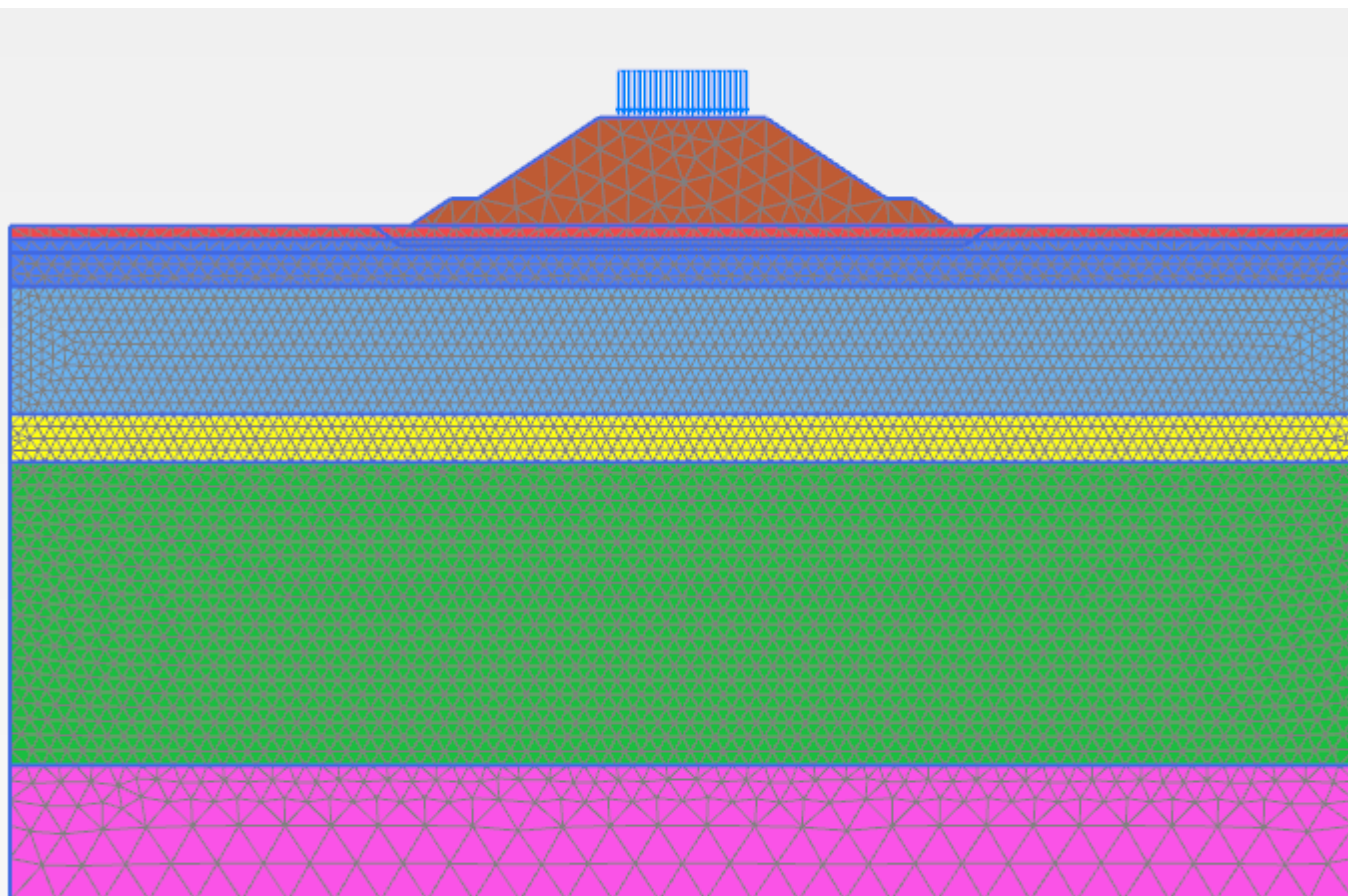


Figura 4: Modello rilevato Sezione 00+265 NV02\_SS16

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- Generazione dello stato tensionale iniziale con piano campagna attuale;
- Costruzione del rilevato stradale e messa in opera (durata 6 mesi);
- Consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio della linea stradale (durata 20 anni);

I risultati ottenuti sono mostrati e commentati al successivo punto 8.3.2.

### **8.3.2 Risultati**

Nella figura seguente sono riportati gli spostamenti verticali  $u_y$  per valutare l'andamento dei cedimenti nel tempo in corrispondenza dell'asse stradale (Figura 5). Con un cerchio rosso è individuato il tempo iniziale di valutazione del cedimento residuo.



**NODO INTERMODALE DI BRINDISI  
COLLEGAMENTO FERROVIARIO DELL'AEROPORTO DEL  
SALENTO CON LA STAZIONE DI BRINDISI  
PROGETTO DEFINITIVO**

**RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE  
FERROVIARIE**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IA7K	00 D10	CL	GE0006 002	C	32 di 63

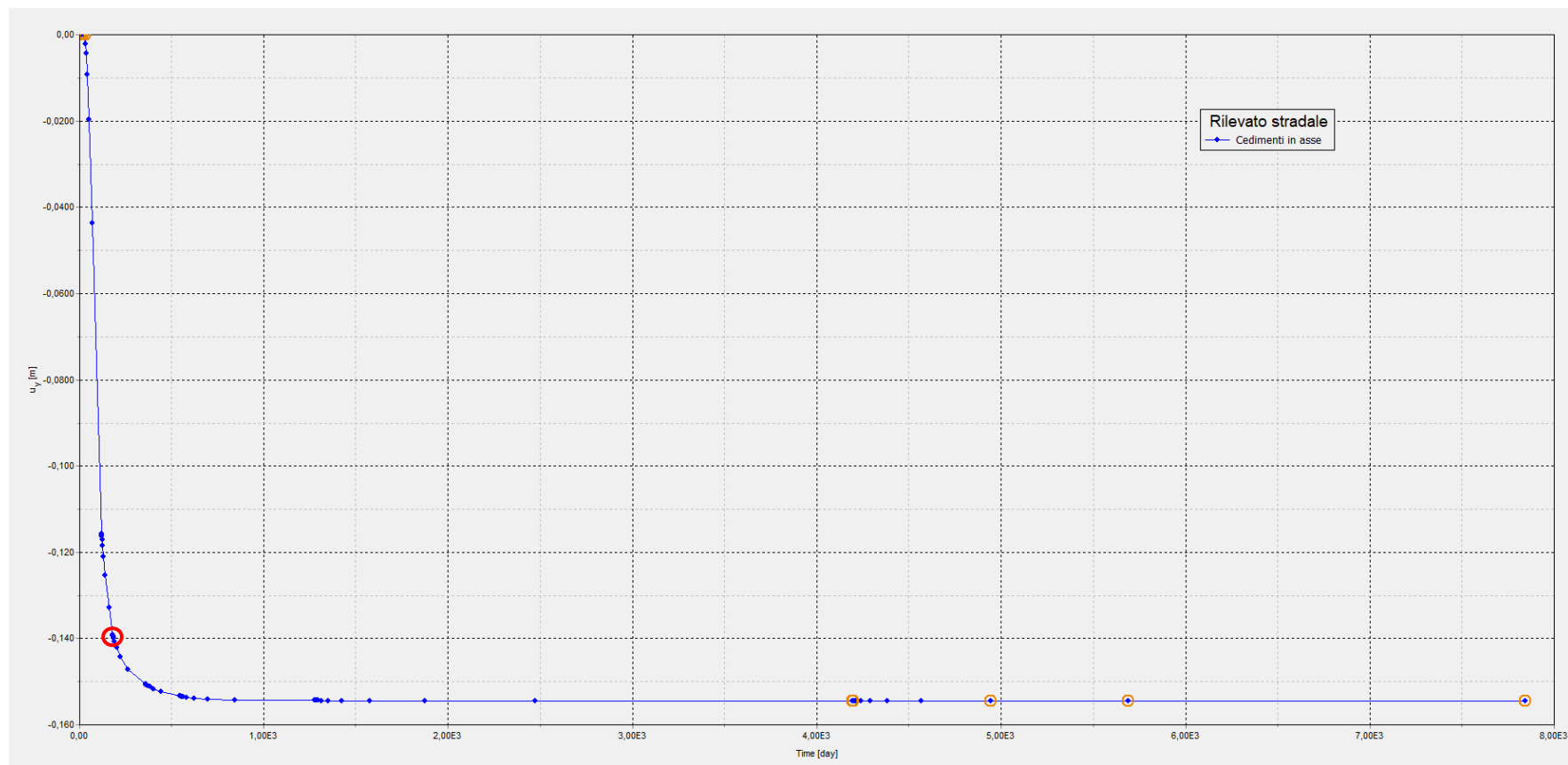


Figura 5: Rilevato Sezione 00+265 NV02\_SS16– Spostamenti verticali in corrispondenza dell'asse del rilevato stradale in funzione del tempo





**NODO INTERMODALE DI BRINDISI  
COLLEGAMENTO FERROVIARIO DELL'AEROPORTO DEL  
SALENTO CON LA STAZIONE DI BRINDISI  
PROGETTO DEFINITIVO**

**RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE  
FERROVIARIE**

COMMESSA IA7K	LOTTO 00 D10	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. C	FOGLIO 33 di 63
------------------	-----------------	----------------	-------------------------	-----------	--------------------

Con riferimento a Manuale di Progettazione RFI DTC SI CS MA IFS 001 D (parte III), a favore di sicurezza, in analogia ai rilevati ferroviari, si è garantito il rispetto del seguente criterio:

- cedimento residuo (differenza tra cedimento di lungo termine e cedimento a fine costruzione rilevato) inferiore a 5cm;

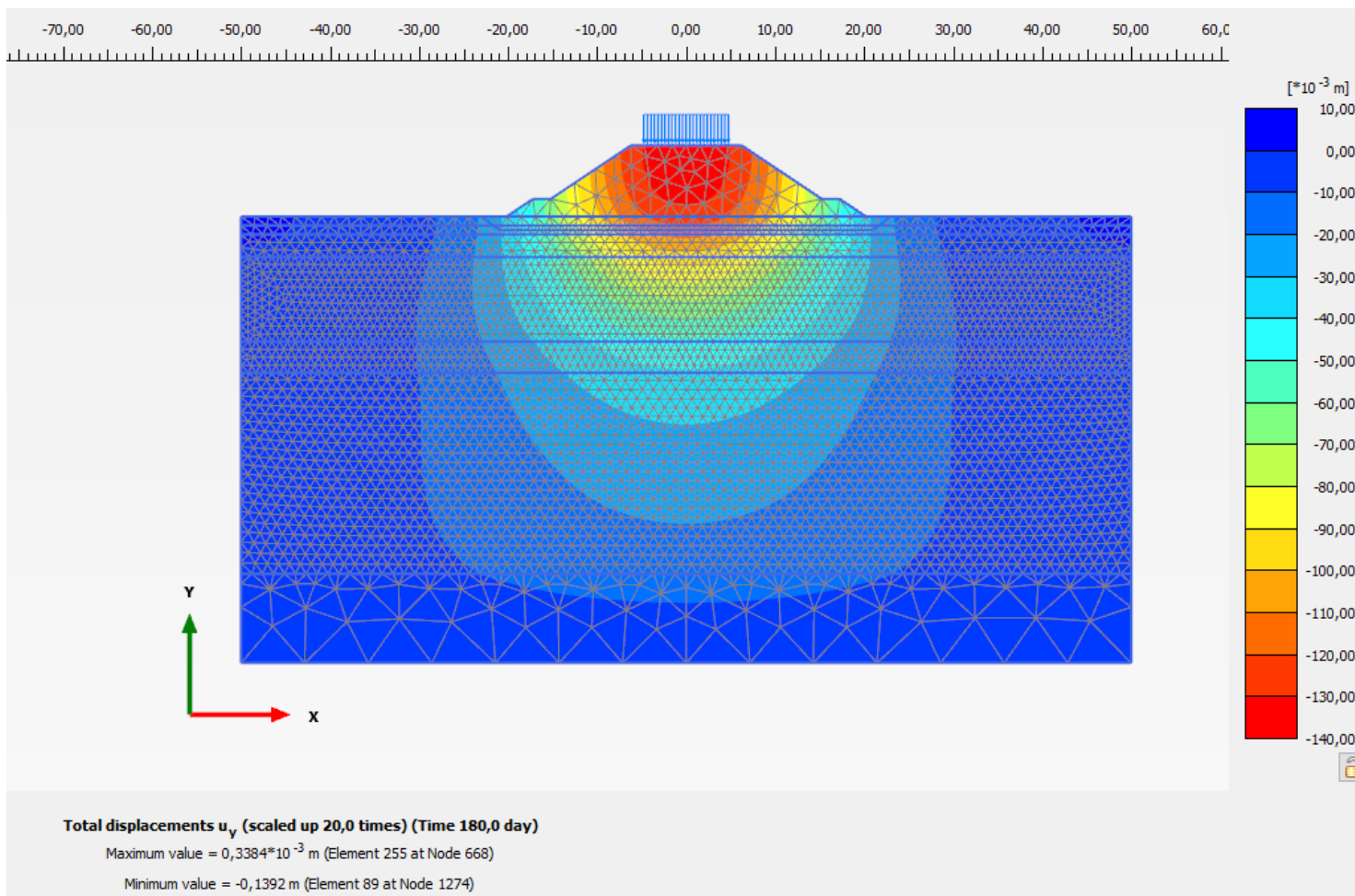


Figura 6: Rilevato Sezione 00+265 NV02\_SS16- Spostamenti verticali termine costruzione

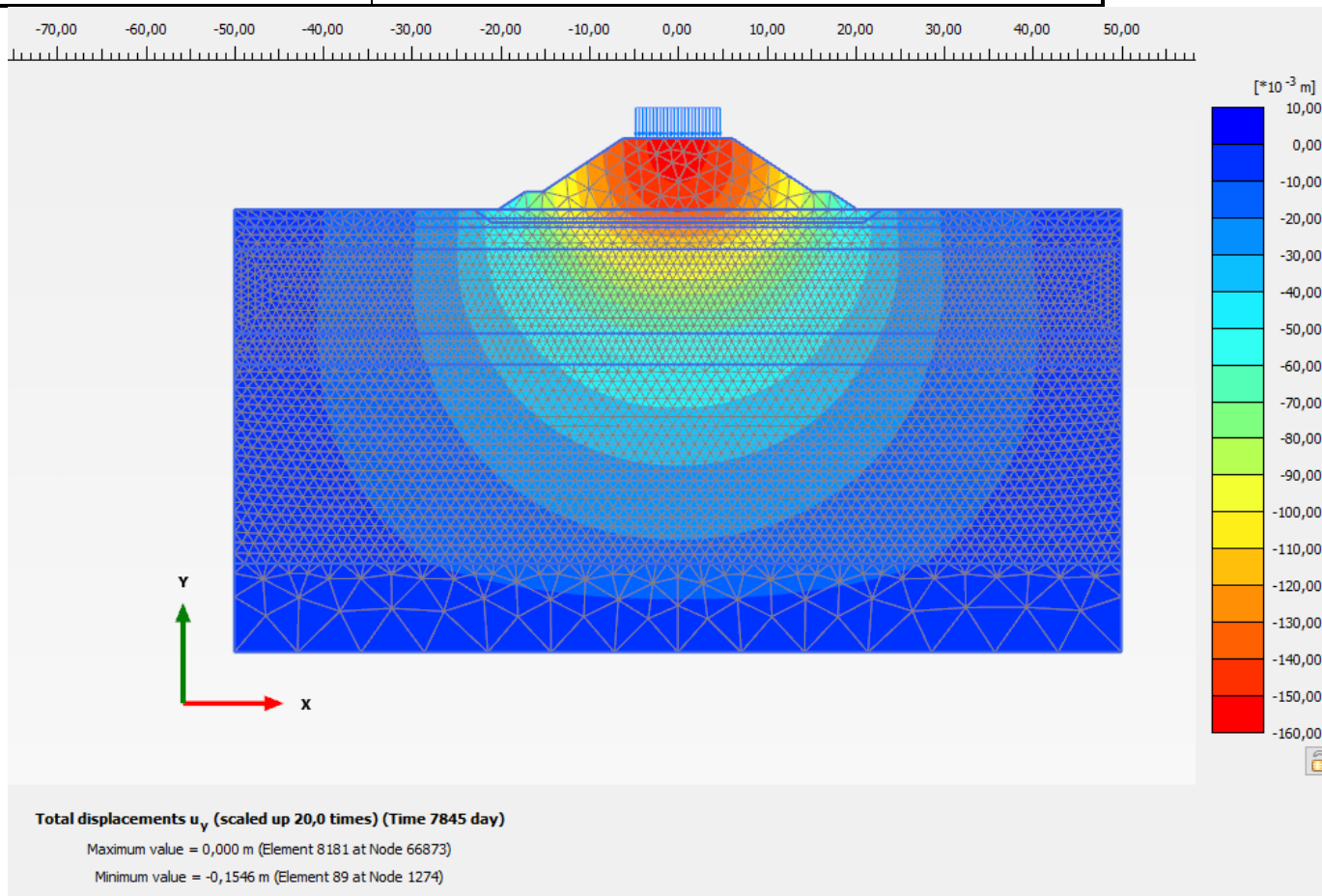


Figura 7: Rilevato Sezione 00+265 NV02\_SS16– Spostamenti verticali lungo termine

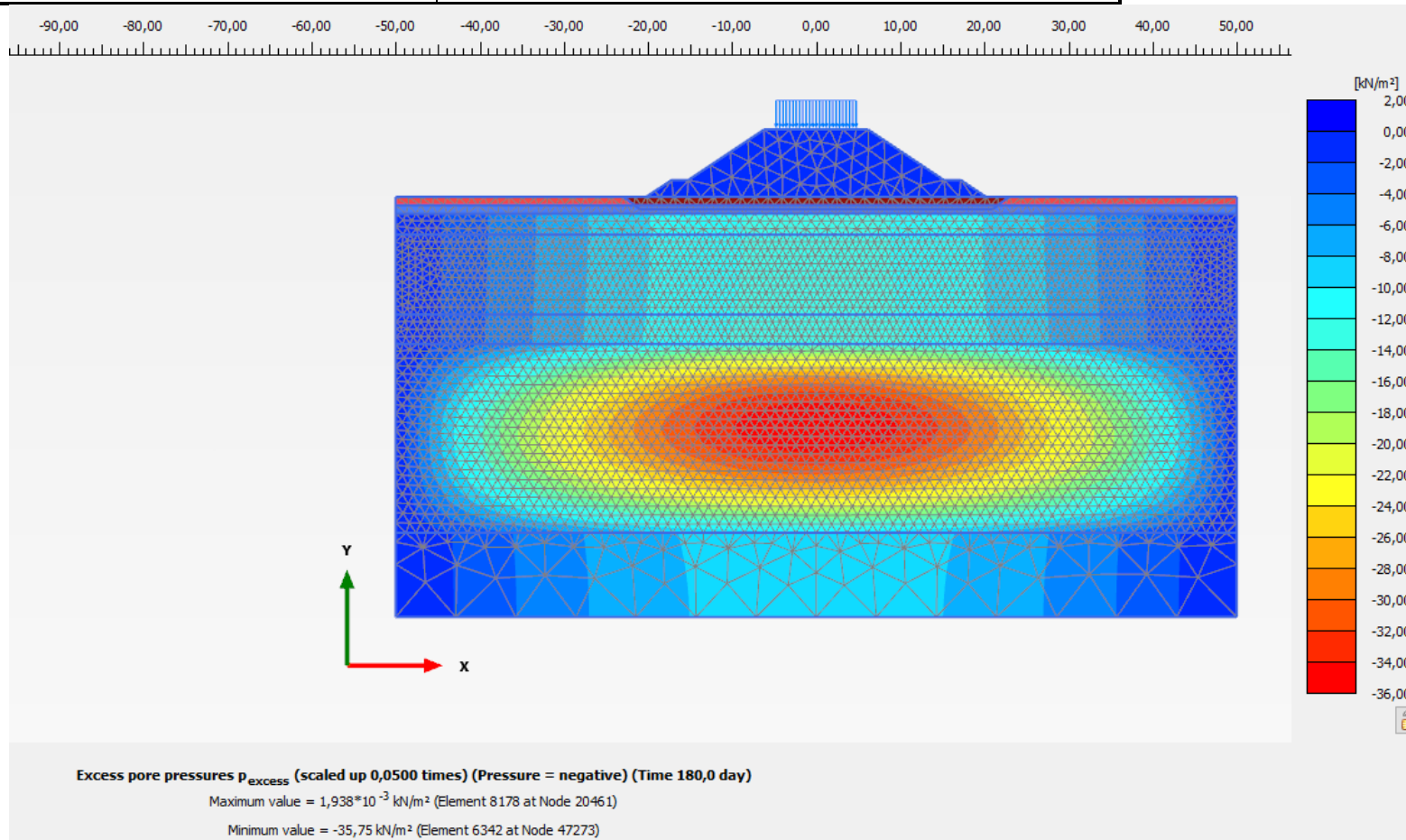


Figura 8: Rilevato Sezione 00+265 NV02\_SS16- Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  termine costruzione

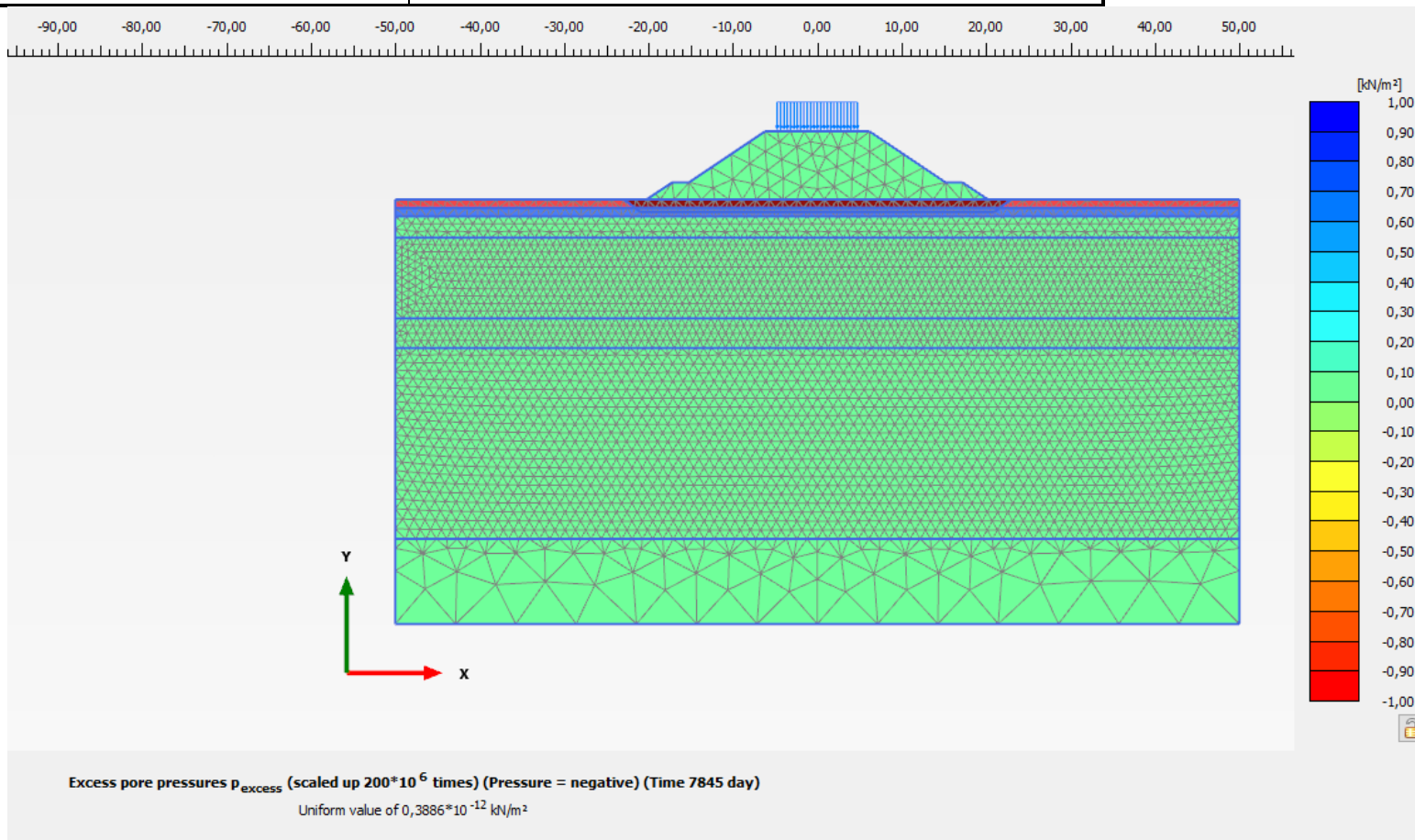


Figura 9: Rilevato Sezione 00+265 NV02\_SS16- Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  lungo termine

Dai risultati dell'analisi ad elementi finiti effettuata risulta che al termine della costruzione il cedimento massimo è pari a 13.9cm, mentre il cedimento dopo 20 anni è pari a 15.5cm.

A questo contributo, è aggiunto il cedimento di consolidazione secondaria, valutato come illustrato al par. 5.2.2:

t (anni)	t <sub>100</sub> (anni)	C <sub>αε</sub>	spessore h <sub>i</sub> (m)	w <sub>cons_sec</sub> (cm)	w <sub>fine_costruz</sub> (cm)	w <sub>20 anni</sub> (cm)	w <sub>tot</sub> (cm) = w <sub>20 anni</sub> + w <sub>cons_sec</sub>	cedimento residuo (cm) = w <sub>tot</sub> - w <sub>fine_costruz</sub>	limite 5cm
20	10	0,12%	22,5	0,8	13,9	15,5	16,3	2,4	ok

Il cedimento residuo, comprensivo degli effetti della consolidazione secondaria, risulta dunque pari a 2.4cm, inferiore rispetto ai 5cm del criterio enunciato.

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.



## 9. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 00+475 NV05 SU SC76 (IV02)

La sezione di progetto alla progressiva 00+475 dell'NV05 su SC76 è costituita da un rilevato contenuto da un muro a U di altezza complessiva pari a 9 m e larghezza pari a circa 14 m.

### 9.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

In accordo a quanto riportato nella Relazione Geotecnica (Doc. Rif.[1]) e sulla base di quanto descritto nel Cap. 3, nella Tabella 9 e Tabella 10 sono riportati la stratigrafia ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto, fattorizzati utilizzando i coefficienti M2 contenuti nella Tabella 2 della presente relazione.

Si rimanda invece alla Tabella 6 per i valori dei parametri geotecnici relativi ai materiali antropici utilizzati per il corpo del rilevato e per lo strato di scotico

Si ricorda che, come definito al Cap. 7 del Doc. Rif.[4], le verifiche geotecniche SLU di stabilità globale dei rilevati, in campo statico, richiedono l'adozione della sola Combinazione 2 dell'Approccio 1 e pertanto l'applicazione dei soli coefficienti parziali M2, mentre per le verifiche sismiche e per le verifiche SLE, finalizzate alla determinazione dei cedimenti, sono richiesti i parametri caratteristici.

Tabella 9: Stratigrafia di calcolo per la sezione 00+475 NV05\_SC76

Strato	Profondità da [m da p.c.]	Profondità a [m da p.c.]	Descrizione
Ls(ms)	0	1.5	Limo marrone scuro
S <sub>L</sub> (Cal)	1.5	7	Sabbia limosa/limo sabbioso color avana con possibili intercalazioni calcarenitiche
Ls(ga)	7	21	Limo sabbioso grigio azzurro
A <sub>L</sub>	21	50	Argilla limosa grigio azzurra

Tabella 10: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 00+475 NV05\_SC76 – Materiali in situ

STRATO	Descrizione strato	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Resistenza al taglio non drenata		Modulo di Young operativo	Permeabilità
		$\gamma_d$	$\phi'_k$	$\phi'_d$	$c'_k$	$c'_d$	$c_u$	$c_u$	$E_{op.}$	$k$
		[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[m/s]
Ls(ms)	Limo marrone scuro	19	26	21.3	5	4	-	-	10	1.0E-08
S <sub>L</sub> (Cal)	Sabbia limosa/limo sabbioso color avana con possibili	19	29	23.9	3	2.4	-	-	20 (prof< 4.5m) 24 (prof> 4.5m)	1.0E-07

**RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE  
FERROVIARIE**

COMMESSA IA7K LOTTO 00 D10 CODIFICA CL DOCUMENTO GE0006 002 REV. C FOGLIO 40 di 63

	intercalazioni calcarenitiche									
Ls(ga)	Limo sabbioso grigio azzurro	19.5	26	21.3	7	5.6	50	35.7	33	1.0E-07
Al	Argilla limosa grigio azzurra	20	23	18.8	15	12	0.3·sv	0.3·sv/1.4	(2.5·G <sub>0</sub> )/10	1.0E-09

Dove:  $G_0 = 85 \cdot (\sigma'_{v0}/p_a)^{0.65}$  (assumendo la falda ad 3 m da pc)

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli ad una quota di circa 3.0 m dal piano campagna.

## 9.2 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

### 9.2.1 Modelli e fasi di calcolo

Il modello utilizzato per queste analisi è mostrato nella Figura 10 .

La stratigrafia di calcolo utilizzata è riportata in Tabella 9 utilizzando i parametri caratteristici riportati in Tabella 10.

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

Il muro è stato modellato come un elemento rigido avente peso specifico pari a 24kN/m<sup>3</sup>. Il piano di fondazione è stato posto pari a 1.5m circa rispetto al piano campagna.



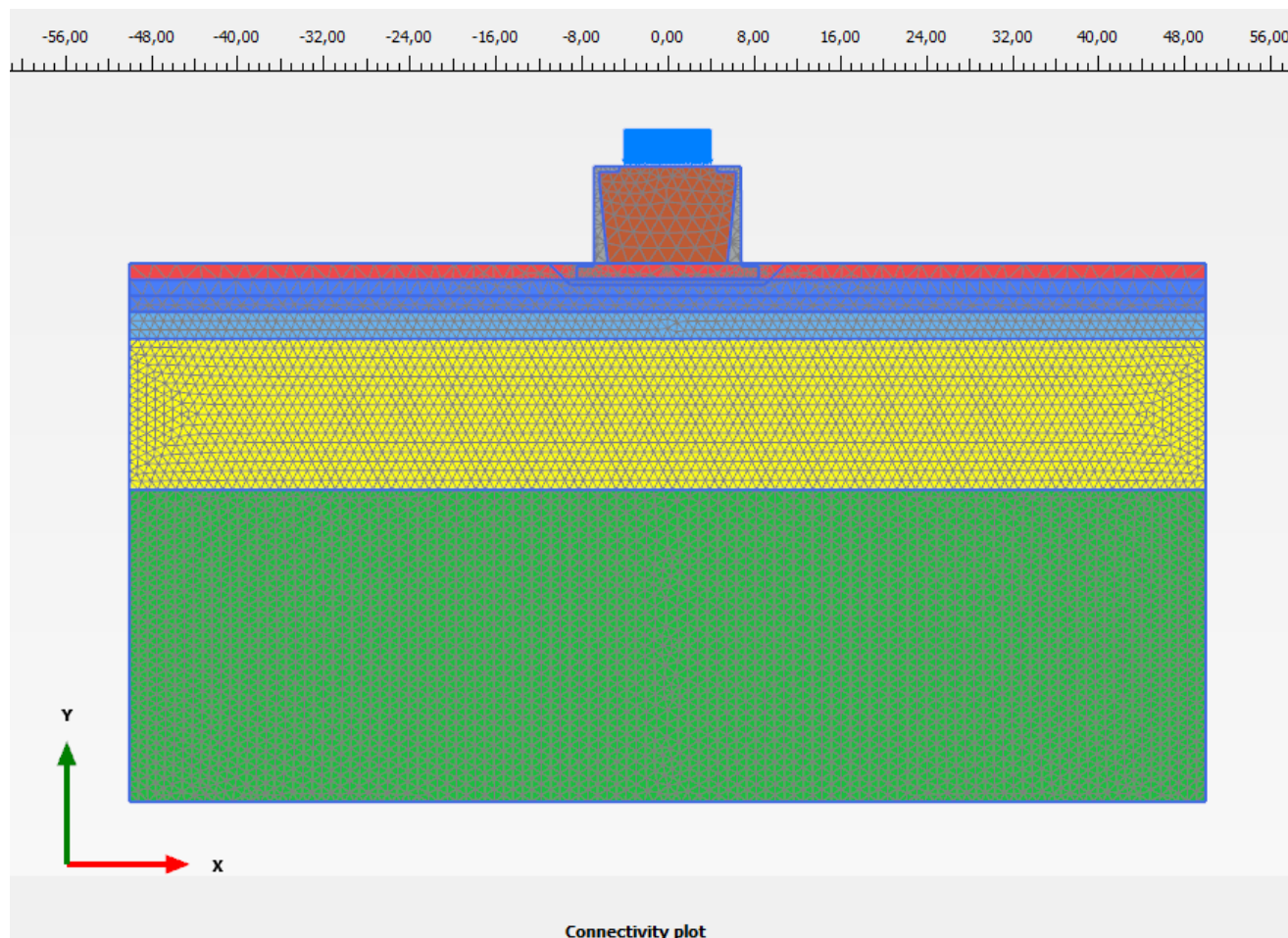


Figura 10: Modello rilevato sezione 00+475 NV05\_SC76

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- Generazione dello stato tensionale iniziale con piano campagna attuale;
- Costruzione del muro, del rilevato stradale e messa in opera (durata 6 mesi)
- Consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio della linea stradale (durata 20 anni);

I risultati ottenuti sono mostrati e commentati al successivo punto 9.2.2.

### 9.2.2 Risultati

Nella figura seguente sono riportati gli spostamenti verticali  $u_y$  per valutare l'andamento dei cedimenti nel tempo in corrispondenza dell'asse stradale (Figura 5). Con un cerchio rosso è individuato il tempo iniziale di valutazione del cedimento residuo.

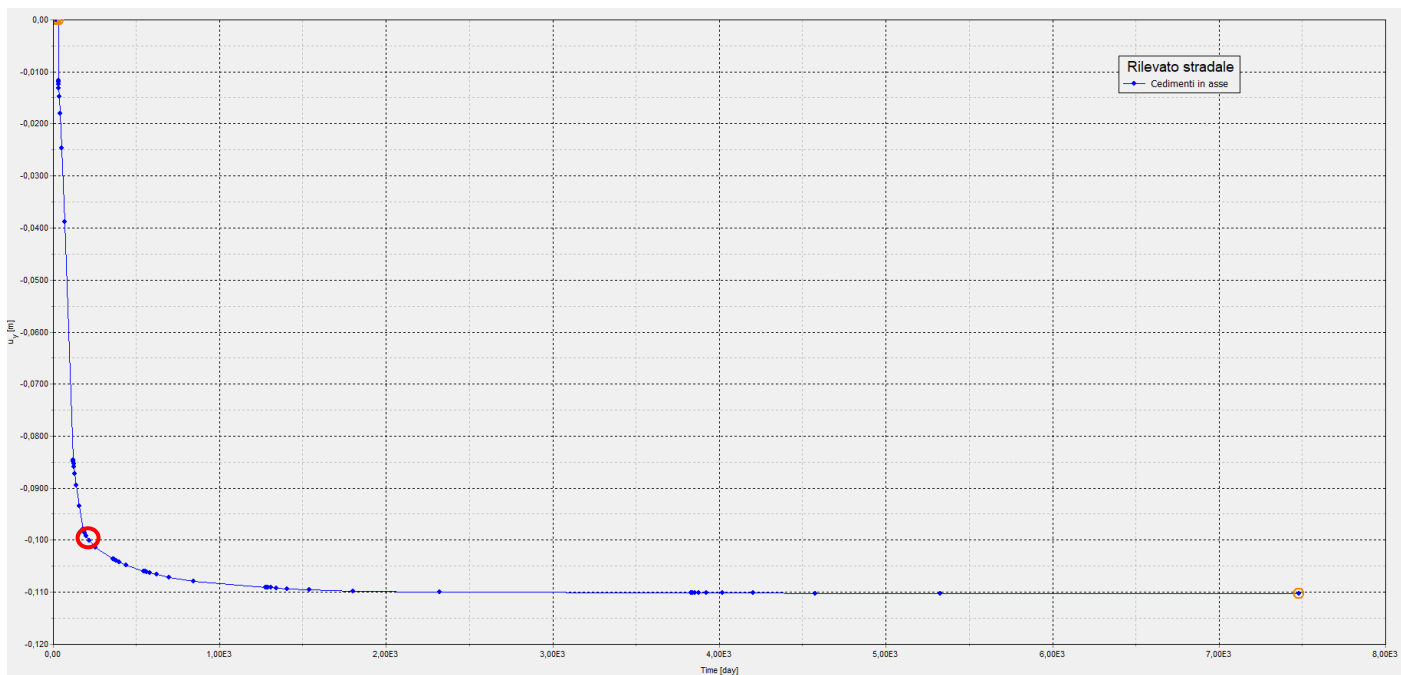


Figura 11: Rilevato sezione 00+475 NV05\_SC76– Spostamenti verticali in corrispondenza dell'asse del rilevato stradale in funzione del tempo



**NODO INTERMODALE DI BRINDISI  
COLLEGAMENTO FERROVIARIO DELL'AEROPORTO DEL  
SALENTO CON LA STAZIONE DI BRINDISI  
PROGETTO DEFINITIVO**

**RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI E TRINCEE  
FERROVIARIE**

COMMESSA IA7K	LOTTO 00 D10	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. C	FOGLIO 43 di 63
------------------	-----------------	----------------	-------------------------	-----------	--------------------

Con riferimento a Manuale di Progettazione RFI DTC SI CS MA IFS 001 D (parte III), a favore di sicurezza, in analogia ai rilevati ferroviari, si è garantito il rispetto del seguente criterio:

- cedimento residuo (differenza tra cedimento di lungo termine e cedimento a fine costruzione rilevato) inferiore a 5cm;

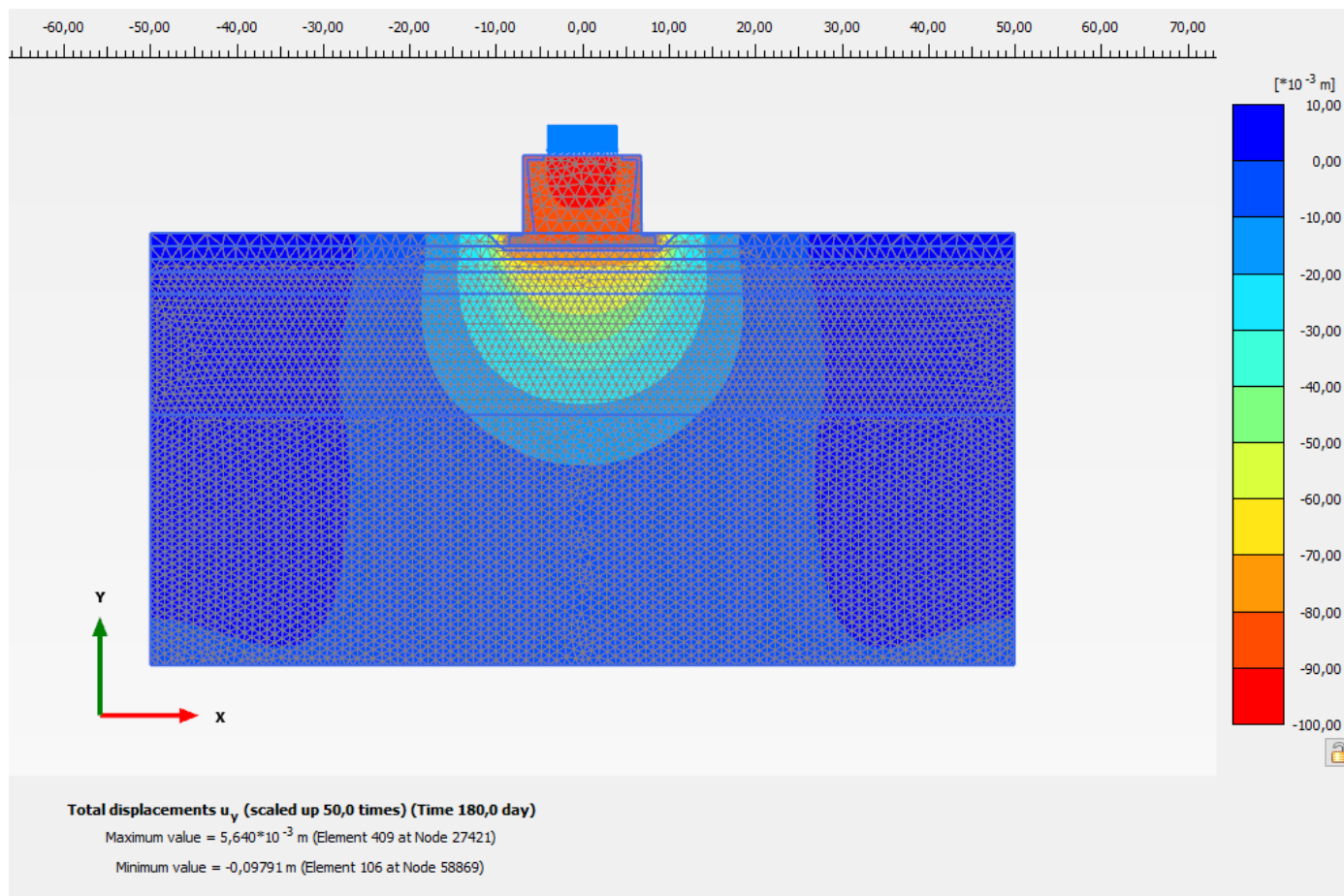


Figura 12: Rilevato sezione 00+475 NV05\_SC76- Spostamenti verticali termine costruzione

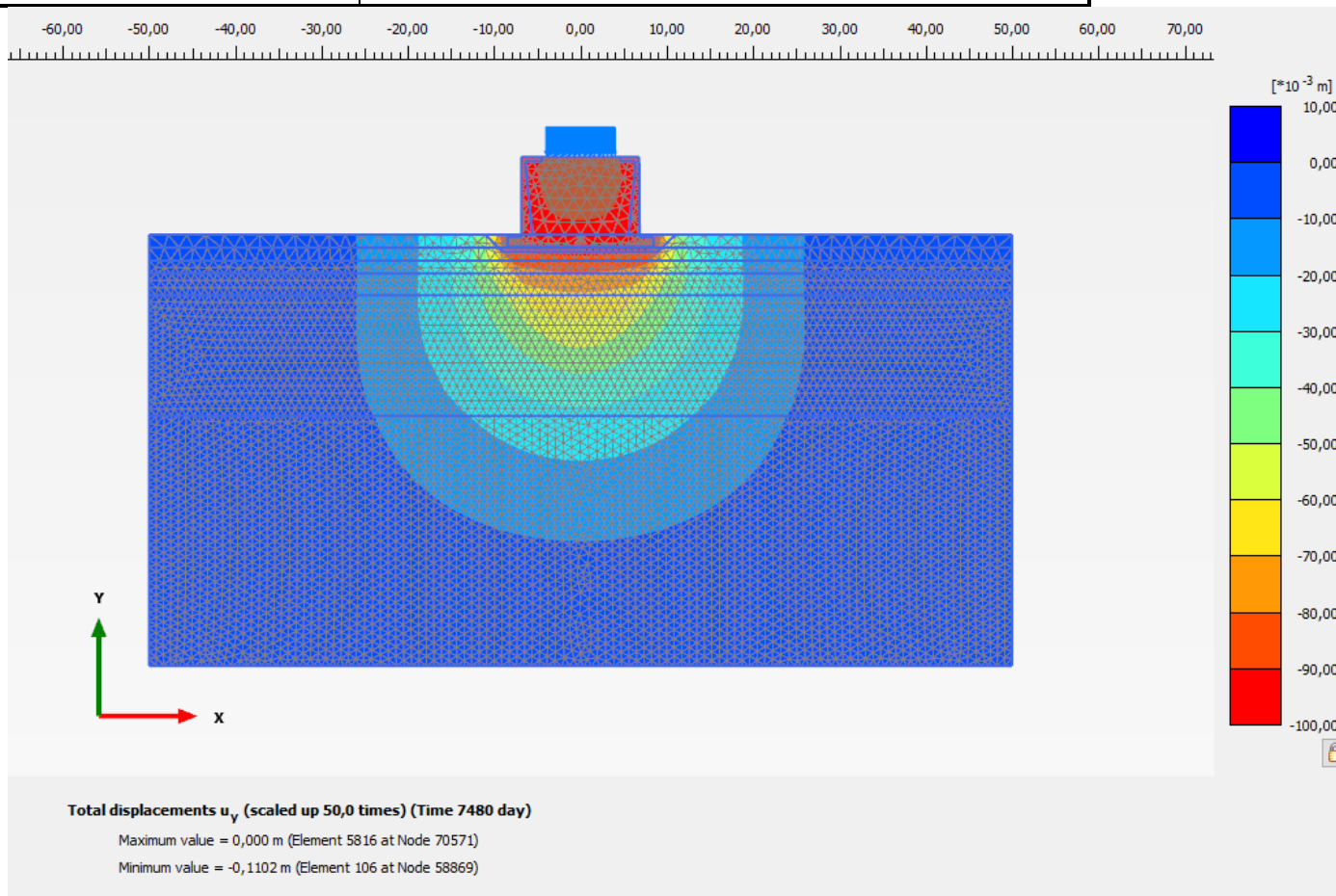


Figura 13: Rilevato sezione 00+475 NV05\_SC76- Spostamenti verticali lungo termine



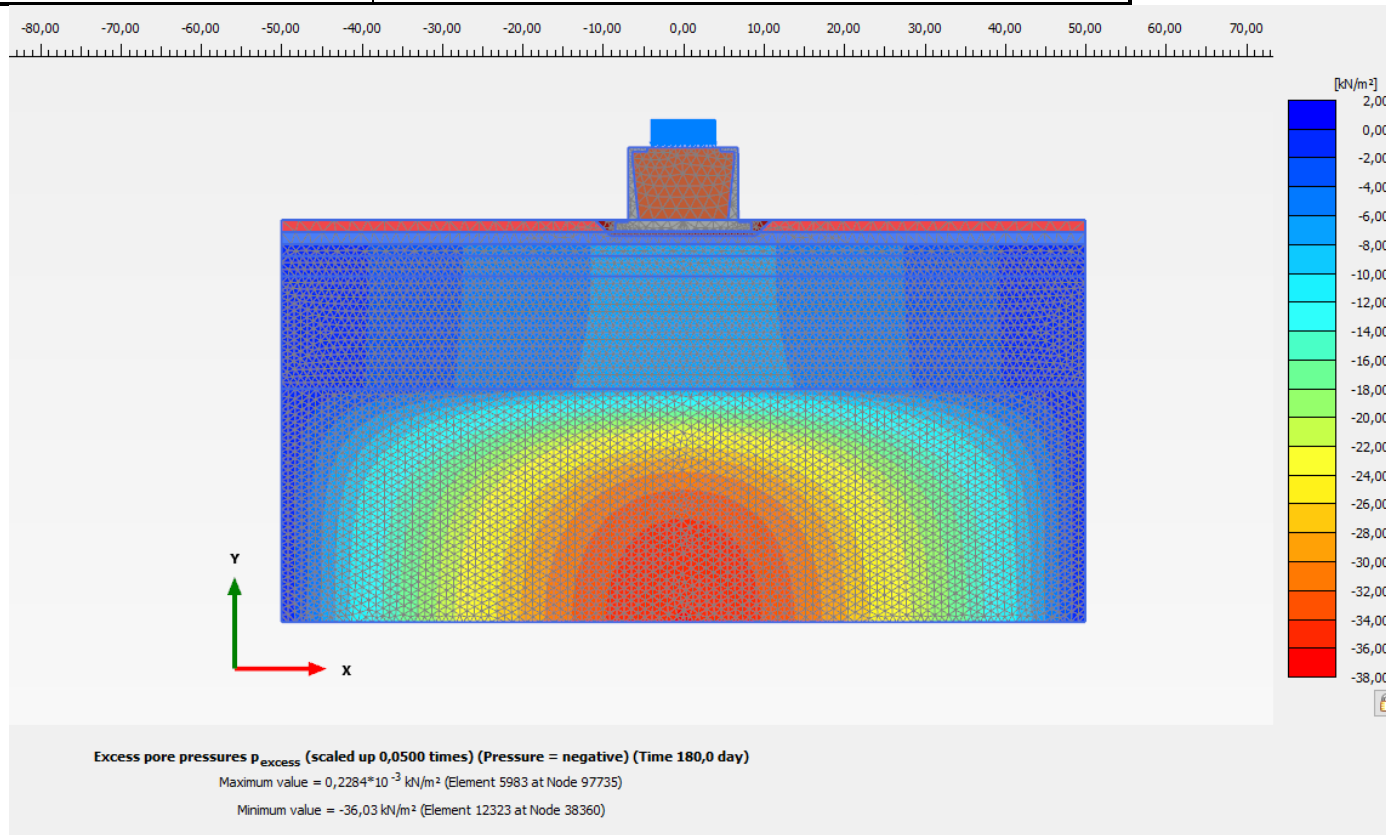


Figura 14: Rilevato sezione 00+475 NV05\_SC76– Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  verticali termine costruzione

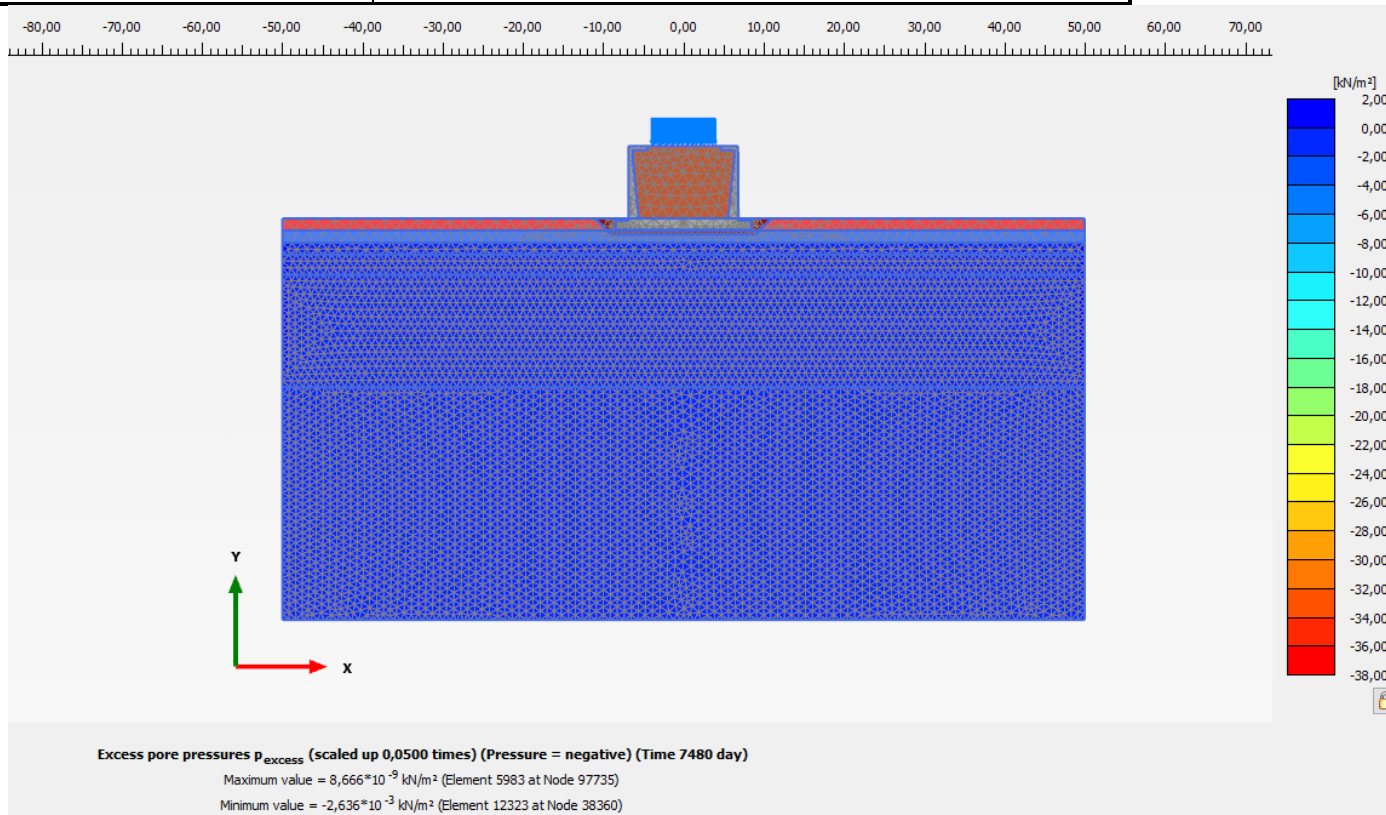


Figura 15 rilevato sezione 00+475 NV05\_SC76– sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  lungo termine

Dai risultati dell'analisi ad elementi finiti effettuata risulta che al termine della costruzione il cedimento massimo è pari a 9.8cm, mentre il cedimento dopo 20 anni è pari a 11cm.

A questo contributo, è aggiunto il cedimento di consolidazione secondaria, valutato come illustrato al par. 5.2.2:

t (anni)	t <sub>100</sub> (anni)	C <sub>αε</sub>	spessore h <sub>i</sub> (m)	w <sub>cons_sec</sub> (cm)	w <sub>fine_costruz</sub> (cm)	w <sub>20 anni</sub> (cm)	w <sub>tot</sub> (cm) = w <sub>20 anni</sub> + w <sub>cons_sec</sub>	cedimento residuo (cm) = w <sub>tot</sub> - w <sub>fine_costruz</sub>	limite 5cm
20	10	0,12%	29	1,1	9,8	11	12,1	2,3	ok

Il cedimento residuo, comprensivo degli effetti della consolidazione secondaria, risulta dunque pari a 2.3cm, inferiore rispetto ai 5cm del criterio enunciato.

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.



## 10. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 00+325 NV05 SU SC76 (IV02)

La sezione oggetto di verifica, ubicata alla progressiva 00+325 della SC76 (NV05) è costituita da un rilevato di altezza pari a 9.5 metri.

### 10.1 STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

La sezione in esame appartiene alla stessa opera d'arte della sezione analizzata nel capitolo precedente per cui è possibile far riferimento alle stesse condizioni stratigrafiche (Tabella 9) e agli stessi i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto (Tabella 10).

Si rimanda invece alla Tabella 6 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).

### 10.2 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. [10]). 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. Tali coefficienti sono contenuti nella Tabella 1 e nella Tabella 2 della presente relazione.

Come da NTC 2018 (Doc. Rif. [4]), la verifica SLU di stabilità globale è soddisfatta se la relazione:  
 $FS \geq R2 = 1.1$

è verificata in condizioni statiche e la relazione:

$$FS \geq R2 = 1.2$$

È verificata in condizioni sismiche.

Il coefficiente R2 è contenuto nella Tabella 3 della presente relazione.

#### 10.2.1 Verifiche in condizioni statiche

L'analisi di stabilità globale in campo statico è stata condotta in accordo alla combinazione DA1C2 assumendo i parametri geotecnici M2 di cui in [4] in Tabella 10 e Tabella 6 rispettivamente per i materiali in sito e per i materiali antropici.

Il traffico stradale è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 20 kPa. Il carico è stato applicato sulla sommità del rilevato per una larghezza complessiva di circa 8.0 m. Tale carico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico moltiplicato per 1.3.

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare la piattaforma stradale. Tra esse, è definita critica quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo.

Si sottolinea che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e che non interessano la sede stradale.

In Figura 2, sono riportate le superfici di rottura critica per la combinazione DA1C2; il fattore di sicurezza FS relativo a tali meccanismi, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS^{\text{MIN}} (\text{DA1C2}) = 1.211$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS^{\text{MIN}} \geq R2 = 1.1,$$

la verifica di stabilità globale in campo statico risulta soddisfatta.

### 10.2.2 Verifiche in condizioni pseudo-statiche

L'analisi di stabilità globale in campo sismico è stata condotta assumendo i parametri geotecnici caratteristici di cui in [4] in Tabella 10 e Tabella 6 rispettivamente per i materiali in sito e per i materiali antropici.

In accordo a quanto riportato al punto 4, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$$K_H = + 0.026 \quad (\text{concorde alla direzione di scivolamento})$$

$$K_V = \pm 0.013 \quad (\text{verificando la più cautelativa tra negativo e positivo})$$

Il traffico stradale è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 20 kPa. Il carico è stato applicato sulla sommità del rilevato per una larghezza complessiva di circa 8.0 m. Tale carico 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. [4]) che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:  $q_d = q_k = 20 \text{ kPa}$ .

Il muro è stato modellato come un elemento rigido avente peso specifico pari a  $24 \text{ kN/m}^3$ . Il piano di fondazione è stato posto pari a 1.5m rispetto al piano campagna.

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico stradale. Tra esse, è definita "critica", quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo.

Si sottolinea che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e che non interessano la sede stradale.

In Figura 3 è riportata la superficie di rottura critica; il fattore di sicurezza FS relativo a tale meccanismo, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS^{MIN}=1.446$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS^{MIN} \geq R2 = 1.2,$$

la verifica di stabilità globale in campo sismico risulta soddisfatta.

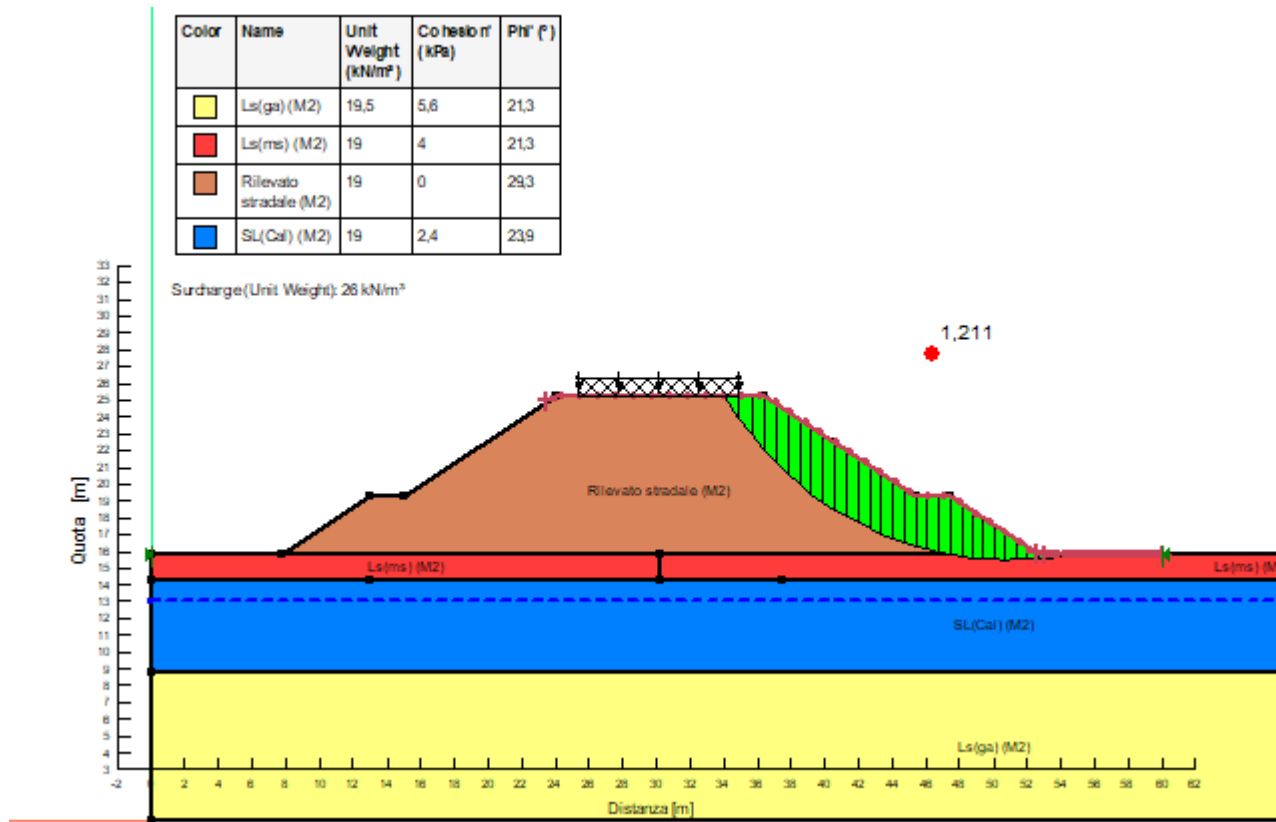


Figura 16: Rilevato H=9.50 m, Sezione 00+325 NV02\_SS16- Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2

Color	Name	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion* (kPa)	Phi* (°)
■	Ls(ga)	19,5	7	26
■	Ls(ms)	19	5	26
■	Rilevato stradale	19	0	35
■	SL(Cal)	19	3	29

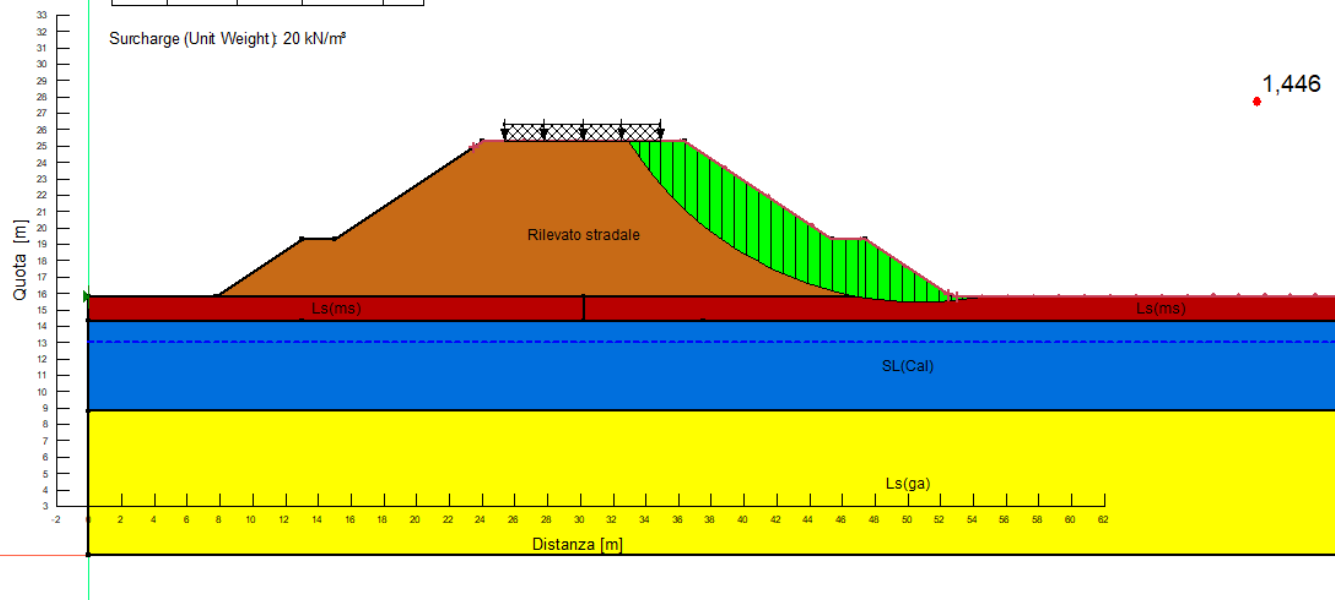


Figura 17: Rilevato H=9.50 m, Sezione 00+325 NV02\_SS16- Analisi di stabilità globale in campo sismico

### **10.3 VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI**

#### **10.3.1 Modelli e fasi di calcolo**

Il modello utilizzato per queste analisi è mostrato nella Figura 18.

La stratigrafia di calcolo utilizzata è riportata in Tabella 9 utilizzando i parametri caratteristici riportati in Tabella 10.

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

Il muro è stato modellato come un elemento rigido avente peso specifico pari a  $24\text{kN/m}^3$ . Il piano di fondazione è stato posto pari a 1.5m rispetto al piano campagna.

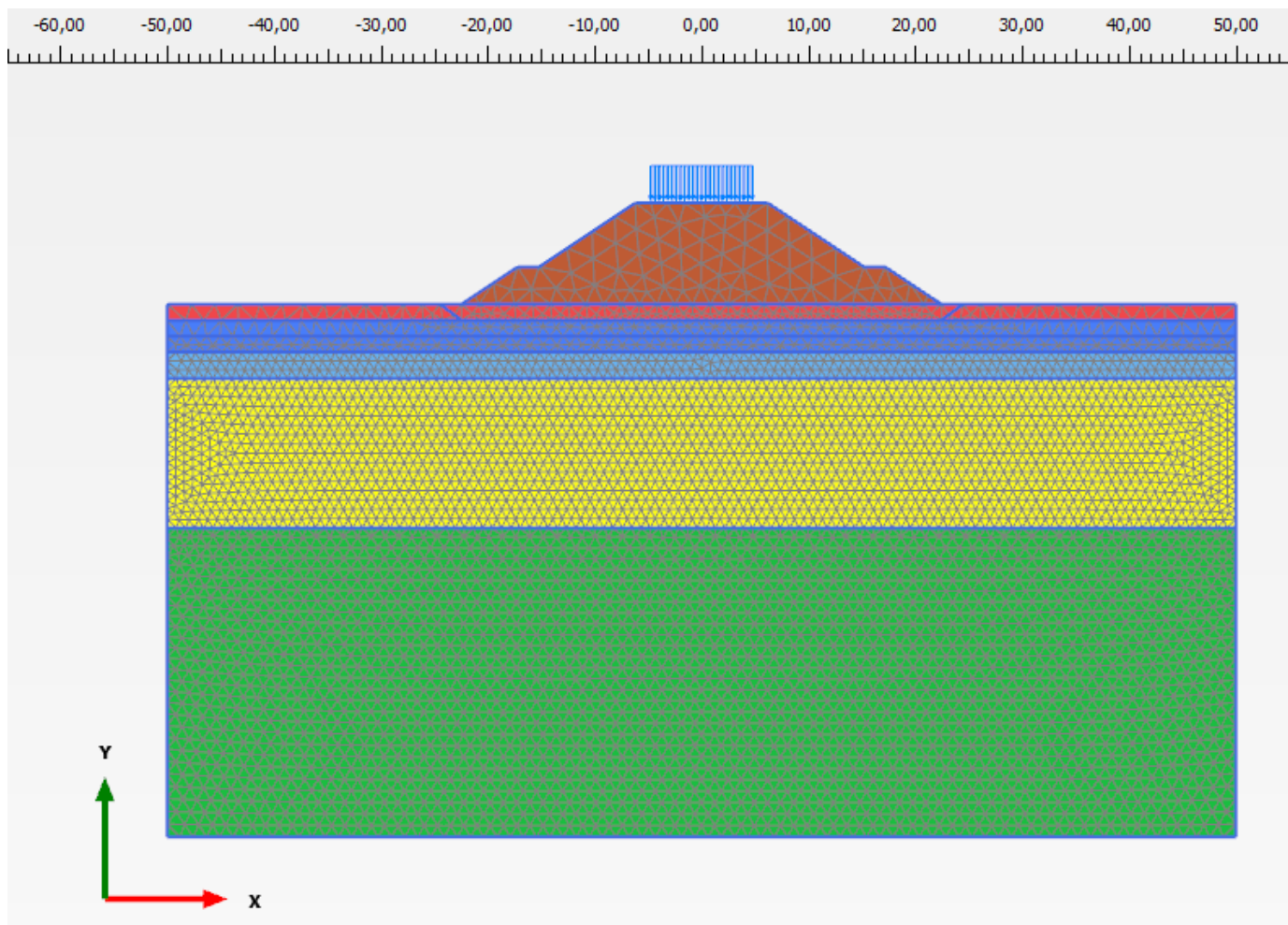


Figura 18: Modello rilevato sezione 00+325 NV05\_SC76

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- Generazione dello stato tensionale iniziale con piano campagna attuale;
- Costruzione del rilevato stradale e messa in opera (durata 6 mesi);
- Consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio della linea stradale (durata 20 anni);

I risultati ottenuti sono mostrati e commentati al successivo punto 9.2.2.

### **10.3.2 Risultati**

Nella figura seguente sono riportati gli spostamenti verticali  $u_y$  per valutare l'andamento dei cedimenti nel tempo in corrispondenza dell'asse stradale (Figura 19) Con un cerchio rosso è individuato il tempo iniziale di valutazione del cedimento residuo.



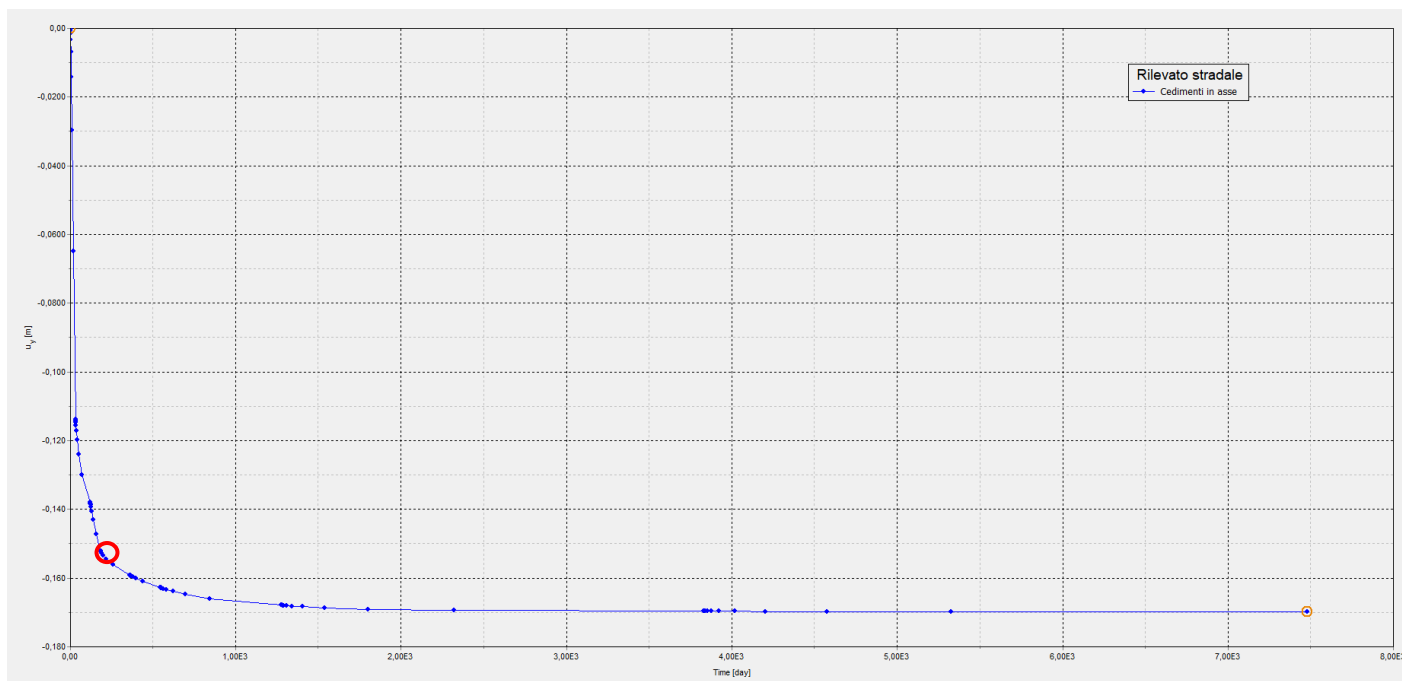


Figura 19: Rilevato sezione 00+325 NV05\_SC76– Spostamenti verticali in corrispondenza della base del rilevato stradale

Con riferimento a Manuale di Progettazione RFI DTC SI CS MA IFS 001 D (parte III), a favore di sicurezza, in analogia ai rilevati ferroviari, si è garantito il rispetto del seguente criterio:

- cedimento residuo (differenza tra cedimento di lungo termine e cedimento a fine costruzione rilevato) inferiore a 5cm;

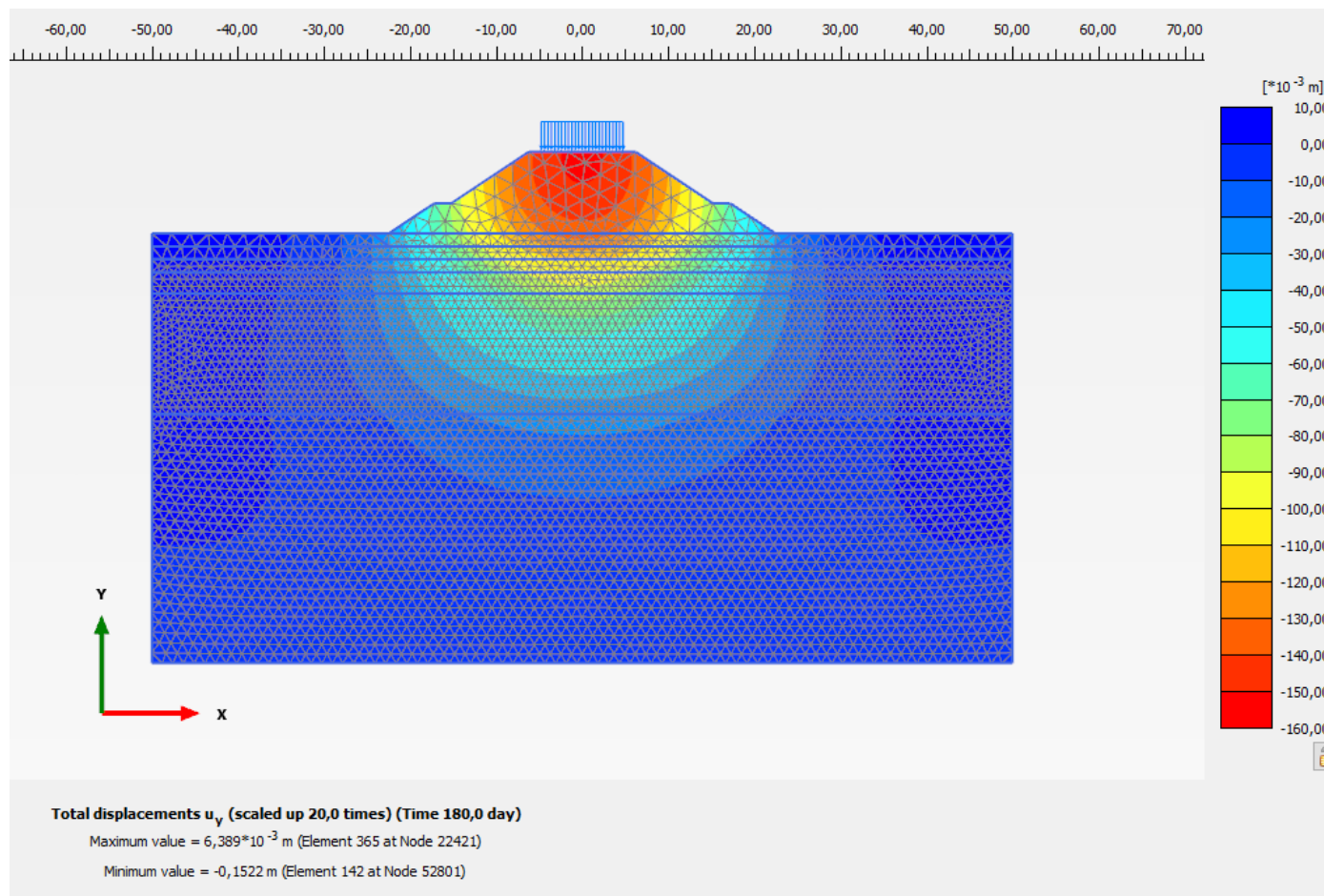


Figura 20: Rilevato sezione 00+325 NV05\_SC76- Spostamenti verticali termine costruzione

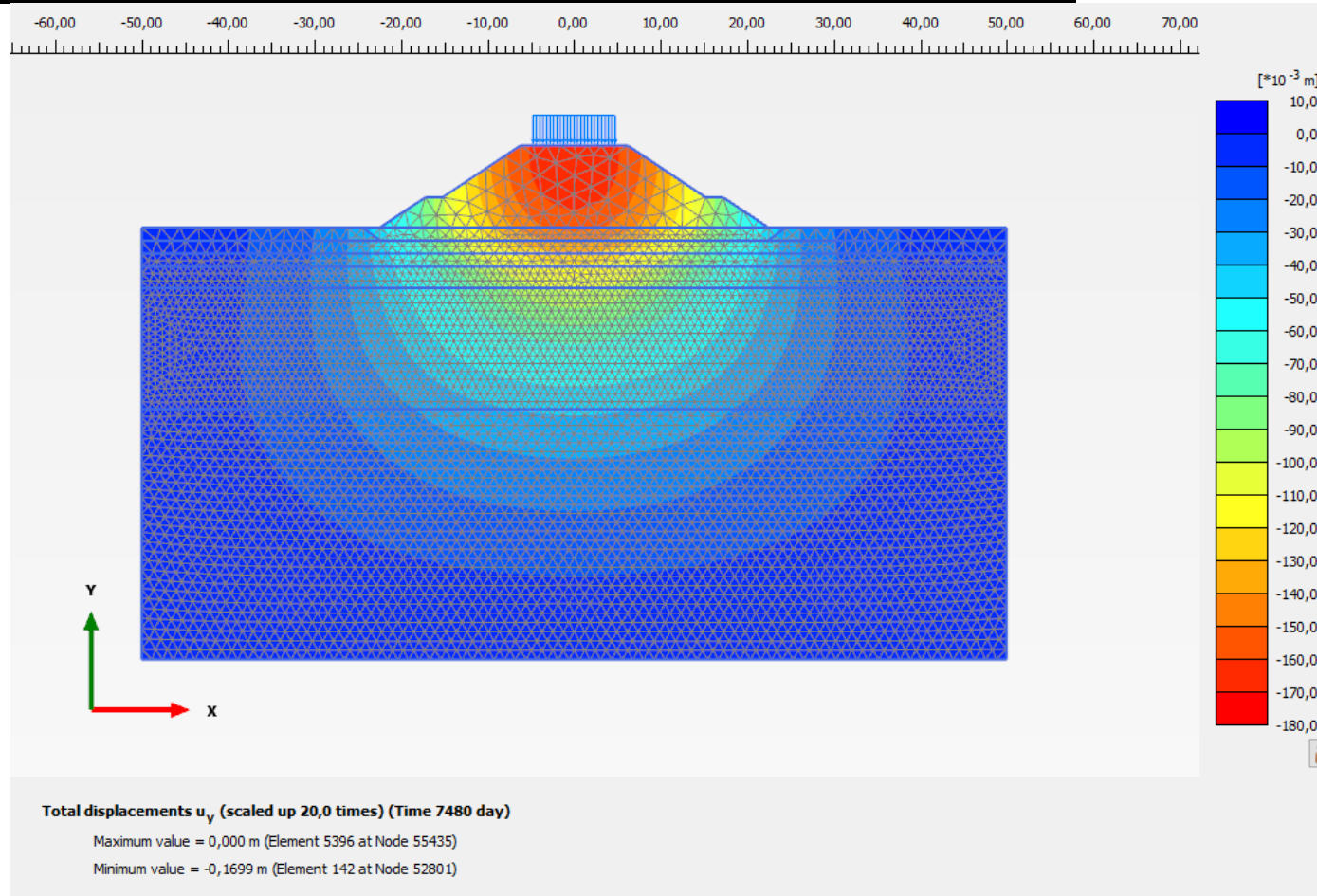


Figura 21: Rilevato sezione 00+325 NV05\_SC76- Spostamenti verticali lungo termine

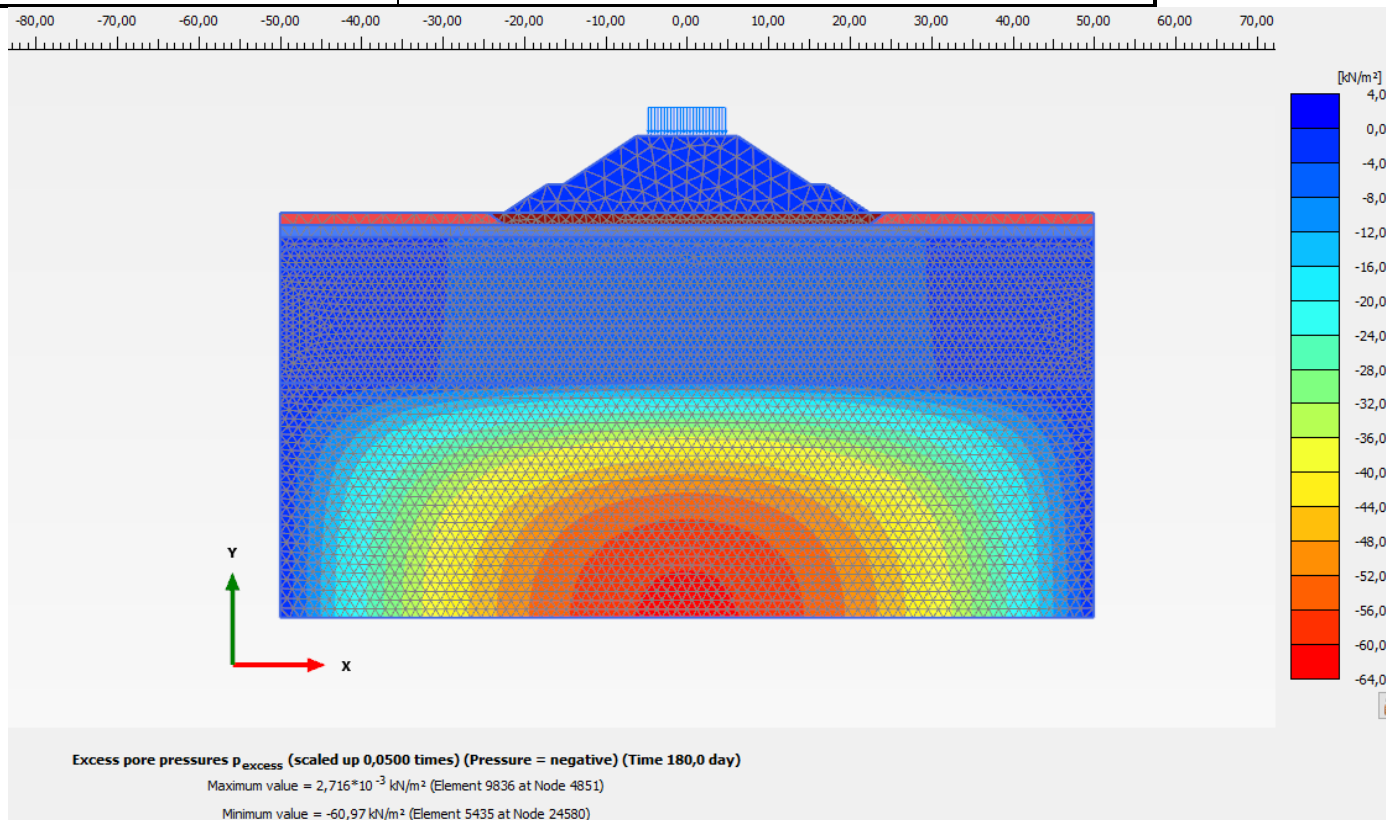


Figura 22: Rilevato sezione 00+325 NV05\_SC76– Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  verticali termine costruzione



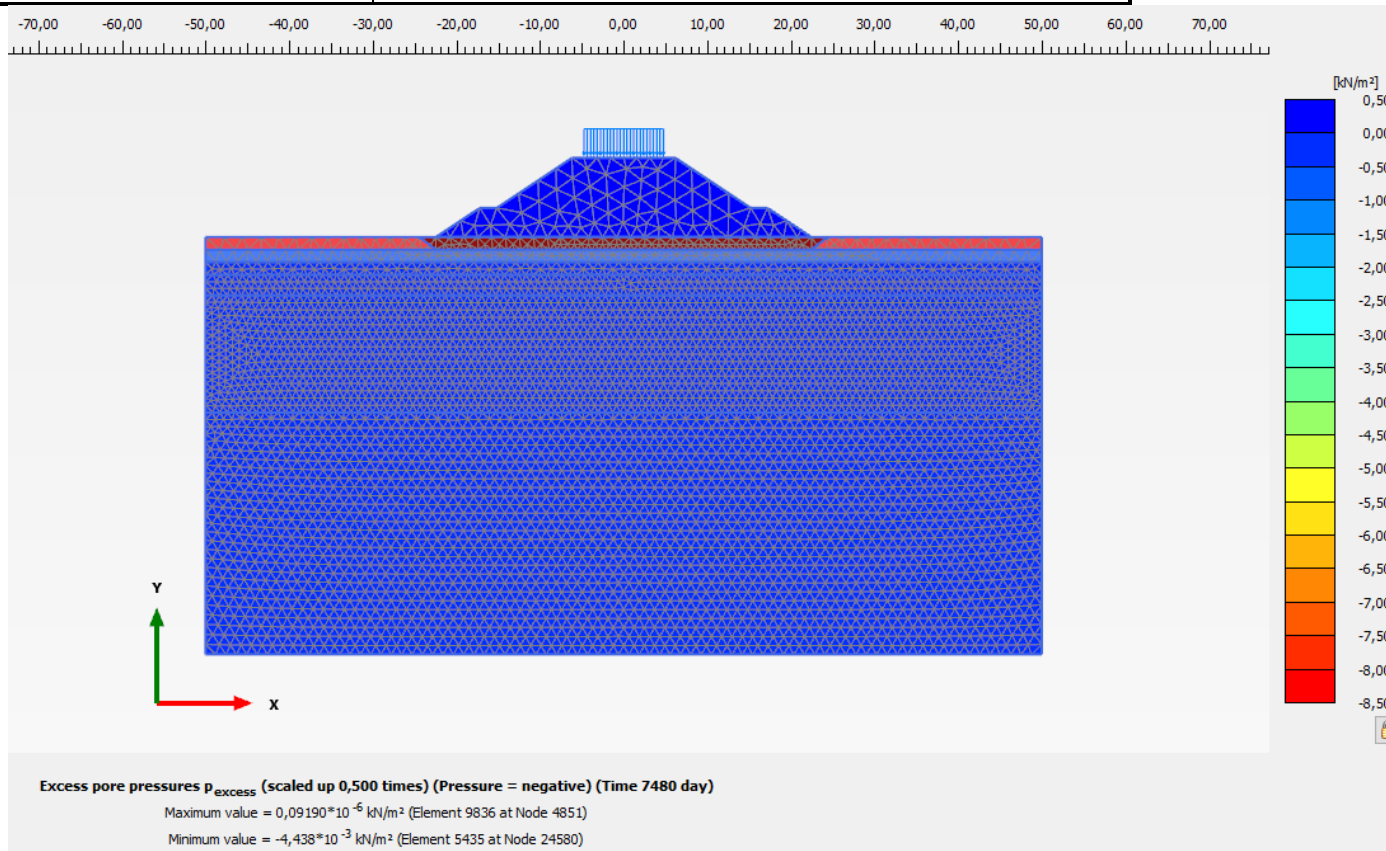


Figura 23: Rilevato sezione 00+325 NV05\_SC76– Sovrappressioni interstiziali  $\Delta u$  lungo termine

Dai risultati dell'analisi ad elementi finiti effettuata risulta che al termine della costruzione il cedimento massimo è pari a 15.2cm, mentre il cedimento dopo 20 anni è pari a 17cm.

A questo contributo, è aggiunto il cedimento di consolidazione secondaria, valutato come illustrato al par. 5.2.2:

t (anni)	t <sub>100</sub> (anni)	C <sub>αε</sub>	spessore h <sub>i</sub> (m)	w <sub>cons_sec</sub> (cm)	w <sub>fine_costruz</sub> (cm)	w <sub>20 anni</sub> (cm)	w <sub>tot</sub> (cm) = w <sub>20 anni</sub> + w <sub>cons_sec</sub>	cedimento residuo (cm) = w <sub>tot</sub> - w <sub>fine_costruz</sub>	limite 5cm
20	10	0,12%	29	1,1	15,2	17	18,1	2,9	ok

Il cedimento residuo, comprensivo degli effetti della consolidazione secondaria, risulta dunque pari a 2.9cm, inferiore rispetto ai 5cm del criterio enunciato.

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.