

COMMITTENTE:



ALTA
SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE
OBIETTIVO N. 443/01**

LINEA AV/AC TORINO – VENEZIA Tratta VERONA – PADOVA

Lotto funzionale Verona – Bivio Vicenza

PROGETTO ESECUTIVO

IV - CAVALCAFERROVIA

IV04 - CAVALCAFERROVIA AL KM 13+241.14

GENERALE

Analisi rilevati di approccio

GENERAL CONTRACTOR		DIRETTORE LAVORI		SCALA -
IL PROGETTISTA INTEGRATORE	Conorzio Iricav Due MALAVENDA Ingegnere degli Ingegneri di Venezia n. 4289 Data: Giugno 2021	ing. Paolo Carmona Data: Giugno 2021		

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.	FOGLIO			
I N 1 7	1 2	E	I 2	R B	I V 0 4 0 0	0 0 2	A	-	-	-	P - - -

	VISTO CONSORZIO IRICAV DUE	
	Firma	Data
	Luca RANDOLFI	

Progettazione:								
Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificat	Data	Approvato	Data	IL PROGETTISTA
A	EMISSIONE	Coding	18/06/21	C.Pinti	18/06/21	P.Luciani	18/06/21	Giuseppe Fabrizio Coppa

CIG. 8377957CD1	CUP: J41E9100000009	File: IN1712E12RBIV0400002A_DOC
		Cod. origine:



Progetto cofinanziato
dalla Unione Europea

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 			
	<p>Progetto</p> <p>IN17</p>	<p>Lotto</p> <p>12</p>	<p>Codifica</p> <p>EI2RBIV0400002</p>	<p>A</p>

INDICE

1. PREMESSA	3
2. NORMATIVA E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	3
2.1 Documenti progettuali	3
2.2 Software	3
2.3 Normativa e standard di riferimento	3
3. CARATTERISTICHE MATERIALI	4
3.1 Calcestruzzo	4
4. DESCRIZIONE DELL'OPERA	5
5. SINTESI DEI PARAMETRI DI CALCOLO	6
5.1 Modello geotecnico di riferimento e condizioni di falda	6
5.2 Materiale del rilevato	7
5.3 Carico gravante sul rilevato	7
6. CRITERI DI VERIFICA IN ACCORDO ALLE NTC2008	8
6.1 Generale	8
6.2 Verifiche di sicurezza in campo statico per opere in materiali sciolti	8
6.2.1 Verifiche Stati Limite Ultimi (SLU)	8
6.2.2 Verifiche Stati limite di esercizio (SLE)	10
6.2.3 Stabilità del sito nei confronti della liquefazione	10
6.3 Verifiche di sicurezza in campo sismico per opere in materiali sciolti	10
6.3.1 Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche	10
6.3.2 Verifiche Stati limite ultimi (SLU)	11
6.3.3 Stati limite di esercizio (SLE)	11
7. COEFFICIENTI SISMICI PER LE VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE	12
8. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA	13
8.1 Codici di calcolo utilizzati	13
8.1.1 Slide	13
8.1.2 Plaxis 2D	13
8.2 Metodologie di verifica adottate	13
8.2.1 Verifiche di stabilità	13
8.2.2 Valutazione degli spostamenti	14
8.3 Sezioni di calcolo	14
9. VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE	16
9.1 Risultati	16
10. VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI	19
10.1 Modelli e risultati	19
10.1.1 Sezione A1	19

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

10.1.2 Sezione A2	23
10.1.3 Sezione B1	26
10.1.4 Sezione B2	29
11. CONCLUSIONI	32

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto	Lotto	Codifica	
	IN17	12	EI2RBIV0400002	A

1. PREMESSA

La presente relazione riporta le analisi dei rilevati di approccio al cavalcaferrovia IV04 al km 13+241.14, nell'ambito della redazione dei documenti tecnici relativi alla progettazione esecutiva della Linea AV/AC Verona-Padova, Sub tratta Verona-Vicenza, 1° Sub Lotto Verona-Montebello Vicentino.

2. NORMATIVA E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

2.1 DOCUMENTI PROGETTUALI

Si richiamano nell'elenco di seguito i documenti di riferimento per la definizione degli aspetti geotecnici.

- [1] IN1712EI2RBIV0400001A Relazione geotecnica
- [2] IN1712EI2BZIN4703001A Inclusioni rigide – Sezioni tipo e dettagli
- [3] IN1712EI2PZIN4703001A Inclusioni rigide - Planimetria e profilo di progetto

2.2 SOFTWARE

- [4] Bentley - Plaxis V20
- [5] Rocscience – Slide v6.0

2.3 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO

- [6] Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008: "Norme Tecniche per le Costruzioni"
- [7] Circolare M.LL.PP. n. 617 del 2 febbraio 2009: Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al Decreto Ministeriale del 14/01/2008"
- [8] UNI-EN 1997-1 – Febbraio 2005: Eurocodice 7. Progettazione geotecnica. Parte 1: Regole generali
- [9] UNI-EN 1998-1 – Marzo 2005: Eurocodice 8: Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici
- [10] UNI-EN 1998-5 – Gennaio 2005: Eurocodice 8: Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici
- [11] RFI DTC SI MA IFS 001 B – Dicembre 2017: Manuale di progettazione delle opere civili.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

3. CARATTERISTICHE MATERIALI

Tutti i materiali previsti per la realizzazione dell'opera sono stati definiti in conformità a quanto espressamente indicato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni emesse con Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008. Nei paragrafi che seguono si elencano le principali caratteristiche fisico-meccaniche richieste ai suddetti materiali.

3.1 CALCESTRUZZO

Calcestruzzo per inclusioni rigide

Classe di resistenza C25/30

classe di esposizione XC2

copriferro minimo $c_{f,min} \geq 60$ mm

modulo elastico $E_c = 31476$ MPa

resistenza caratteristica cubica $R_{ck} = 30$ MPa

resistenza caratteristica cilindrica $f_{ck} = 25$ MPa

resistenza di calcolo calcestruzzo $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$

con $\gamma_c = 1.50$ per SLU

$\gamma_c = 1.00$ per SLE

resistenza di calcolo SLU $f_{cd} = f_{ck} \times 0.85 / \gamma_c = 14.17$ MPa

resistenza di calcolo SLE $f_{cd} = f_{ck} \times 0.85 / \gamma_c = 21.25$ MPa

con

limite di compressione (combinazione rara) $\sigma_c \leq 0.60 \times f_{ck} = 15$ MPa

Misto cementato per ricoprimento delle inclusioni rigide

Cemento tipo CEM I, classe 42.5 R (UNI EN 197-1)

Percentuale legante compresa tra il 2.5% e il 3.5% sul peso degli inerti asciutti

Resistenza a compressione (UNI EN 13286-41): 3.0-4.7 MPa

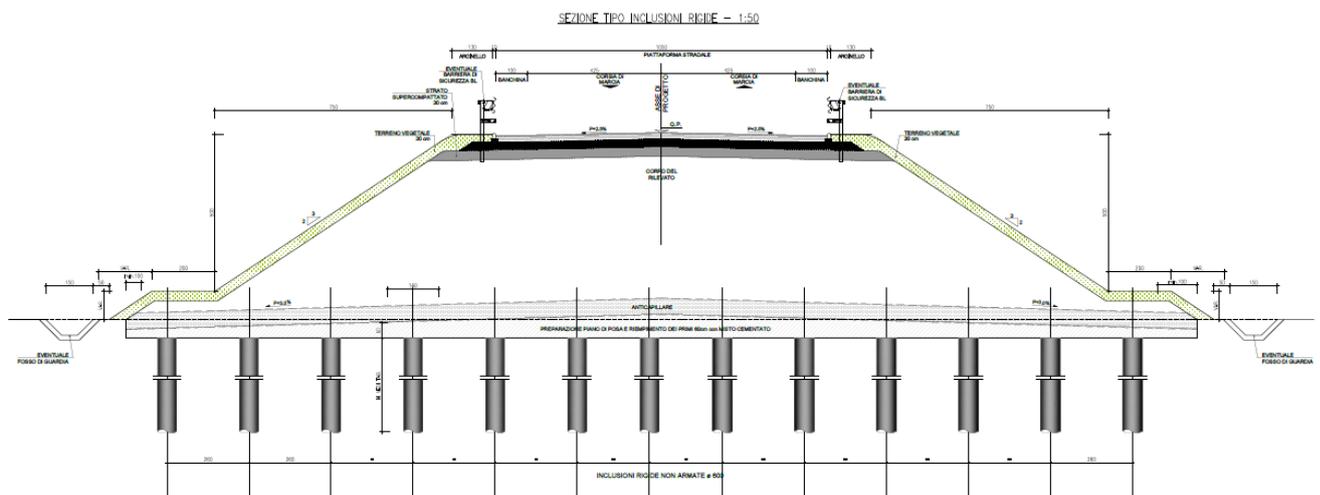
GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

4. DESCRIZIONE DELL'OPERA

I rilevati di approccio oggetto di analisi del presente documento, fanno riferimento all'opera IV04 al km 13+241.14, inserendosi nell'ambito della progettazione esecutiva della Linea AV/AC Torino-Venezia, tratta Verona-Padova, Lotto funzionale Verona-Bivio Vicenza.

Per garantire i requisiti prestazionali dell'opera nel tratto iniziale/finale, laddove si hanno le altezze massime del rilevato in adiacenza alle spalle dei viadotto, a partire dal piano di scotico e di imposta del rilevato si realizzeranno inclusioni rigide ricoperte da uno strato in misto cementato avente la funzione di distribuire il carico sugli elementi di rinforzo del terreno. Le inclusioni saranno costituite da elementi colonnari $\Phi 600$ in calcestruzzo C25/30 non armate, avranno una lunghezza variabile in funzione dell'altezza del rilevato ed un interasse di 2.6 m nelle direzioni trasversale e longitudinale all'asse stradale. Il misto cementato avrà uno spessore pari a circa 0.5 m.

Nella figura che segue si illustra schematicamente la soluzione progettuale del rilevato di approccio. Per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati grafici di progetto.



FASE 1:
SCOTICO DEL PIANO DI POSA DEL RILEVATO E PREPARAZIONE DEL PIANO DI LAVORO PER L'ESECUZIONE DELLE INCLUSIONI RIGIDE (ALTEZZA MINIMA DELLO SCOTICO PARI A 60 cm)

FASE 2:
ESECUZIONE DELLE INCLUSIONI RIGIDE $\Phi 600$

FASE 3:
POSA E COMPATTAZIONE DEL 1° STRATO, MISTO CEMENTATO $sp=60cm$, AL DI SOPRA DELLE INCLUSIONI RIGIDE

Figura 4.1 – Sezione tipo del rilevato di approccio spalla A-B con inclusioni rigide

GENERAL CONTRACTOR 		ALTA SORVEGLIANZA 		
	Progetto	Lotto	Codifica	
	IN17	12	EI2RBIV0400002	A

5. SINTESI DEI PARAMETRI DI CALCOLO

5.1 MODELLO GEOTECNICO DI RIFERIMENTO E CONDIZIONI DI FALDA

Si sintetizzano a seguire i valori caratteristici dei parametri geotecnici relativi ai terreni dell'area in esame, desunti dagli esiti delle indagini e dalle indicazioni emerse dallo studio geologico-geomorfologico della tratta in cui l'opera ricade.

Le formazioni individuate sulla base delle analisi condotte e riportate nei prospetti di seguito fanno riferimento alle unità geotecniche descritte nel seguente elenco:

- Unità 3a/b – Limi argillosi e argille limose debolmente sabbiose da tenere a mediamente compatte;
- Unità 4 – Sabbie debolmente limose/limose da mediamente addensate a molto addensate;
- Unità 6 – Ghiaie/ghiaie sabbiose con presenza locale di ciottoli.

Alla luce dell'eterogeneità stratigrafica rilevata lungo l'opera dai sondaggi di riferimento, si definisce il seguente modello geotecnico per le analisi del rilevato di appoggio.

strato	Formazione	spessore strato	zbase strato	γ	ϕ^k	c^k	c_{uk}	E'	C_c	C_s
		(m)	(m da pc)	(kN/m ³)	(°)	(kPa)	(kPa)	(MPa)	(-)	(-)
1	UG 3a/b	4.5	4.5	18.25		0	52.5	9.5	0.15	0.05
2	UG 6	9	13.5	19.5	39.5	0		75		
3	UG 4	31.5	45	19.5	38	0		170		

LEGENDA

γ = peso di volume naturale;

ϕ^k = valore caratteristico dell'angolo di attrito;

c^k = valore caratteristico della resistenza al taglio in condizioni drenate;

c_{uk} = valore caratteristico della coesione non drenata;

E' = valore del modulo elastico operativo;

C_c = coefficiente di compressione;

C_s = coefficiente di ricomprensione.

Si precisa che, i coefficienti C_c e C_s sono stati desunti a partire dalle prove di compressione edometrica eseguite alle diverse profondità

Cautelativamente il livello di falda è stato assunto coincidente con il p.c., coerentemente con quanto definito nella Relazione idrogeologica di progetto.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

5.2 MATERIALE DEL RILEVATO

Le caratteristiche del rilevato sono di seguito riassunte.

γ [kN/m ³]	Φ [°]	c' [kPa]
19	35	0

Tabella 4.2.1 - Caratteristiche materiale del rilevato

5.3 CARICO GRAVANTE SUL RILEVATO

Nelle analisi condotte sui rilevati di approccio è stato considerato un carico uniformemente distribuito q pari a 20 kPa corrispondente al carico del traffico stradale.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

6. CRITERI DI VERIFICA IN ACCORDO ALLE NTC2008

6.1 GENERALE

Per le opere in esame devono essere svolte le seguenti verifiche di sicurezza e delle prestazioni attese (par. 6.2.3. delle NTC2008):

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

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

$$Ed \leq Rd$$

dove:

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

Rd = valore di progetto della resistenza.

La verifica della condizione $Ed \leq Rd$ 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 Ed 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 delle NTC2008).

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

$$Ed \leq Cd$$

dove:

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

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

La verifica della condizione $Ed \leq Cd$ 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.

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

In base a quanto indicato dalle NTC2008 le verifiche di sicurezza che devono essere condotte per opere costituite da materiali sciolti sono le seguenti.

6.2.1 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 delle NTC2008):

Approccio 1 - Combinazione 2: $A2 + M2 + R2$ tenendo conto dei coefficienti parziali definiti a seguire (rispettivamente Tab.6.2.I, Tab.6.2.II e Tab.6.8.I delle NTC2008).

La verifica di stabilità globale si ritiene soddisfatta se:

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto	Lotto	Codifica	
	IN17	12	EI2RBIV0400002	A

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

essendo R la resistenza globale del sistema (Par. C.6.8.6.2 Circolare NTC 2009), calcolata sulla base delle

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

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

Per le verifiche agli stati limite ultimi si adottano i valori dei coefficienti parziali definiti a seguire (Tab. 6.2.I delle NTC2008).

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_{Q1}	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_{c1}

Tabella 6.2.1.1: Coefficienti parziali sulle azioni (Tab. 6.2.I delle NTC 2008)

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

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

Tabella 6.2.1.2: Coefficienti parziali sui terreni (M1 ed M2) - (Tab. 6.2.II, delle NTC2008)

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

Tabella 6.2.1.3: Coefficienti parziali per le verifiche di stabilità globale (R2) -in campo statico (Tab. 6.8.I, delle NTC2008)

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

6.2.2 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 delle NTC2008), 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, **verrà considerato come accettabile un cedimento di consolidazione massimo di 10 cm.**

6.2.3 STABILITÀ DEL SITO NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE

In base a quanto indicato nelle NTC 2008 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.

Per il tracciato oggetto del presente studio, le verifiche di liquefazione sono contenute nella Relazione geotecnica generale; in sintesi risulta che è stato escluso il rischio di liquefazione nella tratta in esame.

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

6.3.1 STATI LIMITE DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE SISMICHE

Le NTC 2008 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 delle NTC2008:

- 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.

Con riferimento all'opera in oggetto, le verifiche geotecniche in presenza di un evento sismico richiedono la verifica ai seguenti stati limite:

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

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.

6.3.2 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. 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 delle NTC2008, 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 $\gamma_R = 1.1$ (vedasi Par.6.8.2 delle NTC2008).

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 delle NTC2008 le verifiche possono essere condotte mediante metodi pseudo statici, metodi degli spostamenti e metodi di analisi dinamica.

6.3.3 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 NTC2008. Per l'opera in oggetto, le verifiche agli Stati Limite di Esercizio verranno condotte con riferimento allo Stato Limite di Danno (**SLD**).

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

7. COEFFICIENTI SISMICI PER LE VERIFICHE DI STABILITÀ GLOBALE

Come descritto dalle NTC2008, la verifica di stabilità globale in condizioni sismiche va condotta mediante analisi pseudo-statiche adottando i coefficienti sismici k_H (orizzontale) e k_V (verticale), definiti come segue:

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

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

essendo:

a_{\max} = accelerazione sismica di progetto definita nella Relazione geotecnica generale, qui assunto pari a 0.301 (valore massimo per la tratta in oggetto).

β_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito. Il valore del coefficiente β_s da assumere per verifiche allo SLV su fronti di scavo o rilevati, è pari a $\beta_s = 0.28$.

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

a_{\max} (g)	k_H	k_V
0.301	0.084	± 0.042

Tabella 7.1: Valori dei coefficienti sismici per le verifiche di stabilità globale

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

8. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA

8.1 CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI

8.1.1 SLIDE

Slide 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 Slide 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 Slide v.6.0-Rocscience.

8.1.2 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 v20.

8.2 METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE

8.2.1 VERIFICHE DI STABILITÀ

Le verifiche di stabilità dei rilevati (Verifiche SLU) sono state condotte utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite.

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

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

Il codice Slide 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.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

8.2.2 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 Soft Soil per le formazioni coesive superficiali. Il modello geotecnico di sottosuolo adottato è quello riportato al capitolo 4.

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

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

8.3 SEZIONI DI CALCOLO

Le verifiche dei rilevati di approccio delle spalle A e B sono state eseguite prendendo in esame quattro sezioni caratteristiche:

- Sezione A1 posizionata tra la pk 0+275 e la pk 0+225 presenta un'altezza di rilevato pari a circa 9 m ed una larghezza dello stesso di 45 m circa;
- Sezione A2 posizionata tra la pk 0+225 e la pk 0+200 presenta un'altezza di rilevato pari a circa 6.7 m ed una larghezza dello stesso di 38 m circa;
- Sezione B1 posizionata tra la pk 0+445 e la pk 0+495 presenta un'altezza di rilevato pari a circa 9.6 m ed una larghezza dello stesso di 48 m circa;
- Sezione B2 posizionata tra la pk 0+495 e la pk 0+520 presenta un'altezza di rilevato pari a circa 7.7 m ed una larghezza dello stesso di 42 m circa.

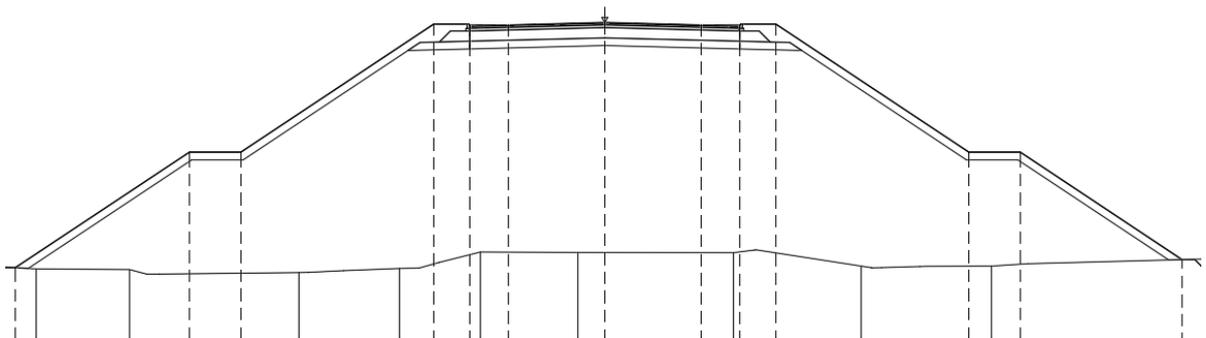


Figura 8.3.1: Sezione A1 del rilevato di approccio alla spalla A, tra pk 0+275 e pk 0+225

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Progetto

Lotto

Codifica

IN17

12

EI2RBIV0400002

A

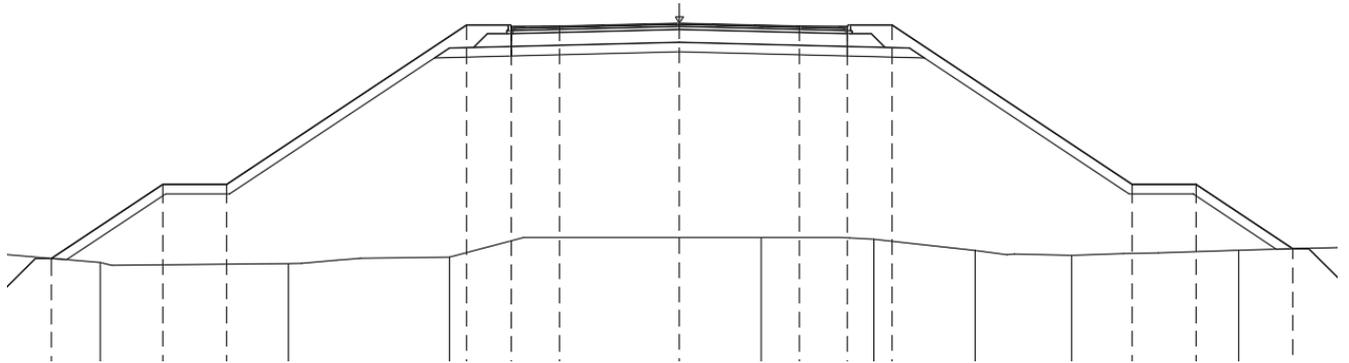


Figura 8.3.2: Sezione A2 del rilevato di approccio alla spalla A, tra pk 0+225 e pk 0+200

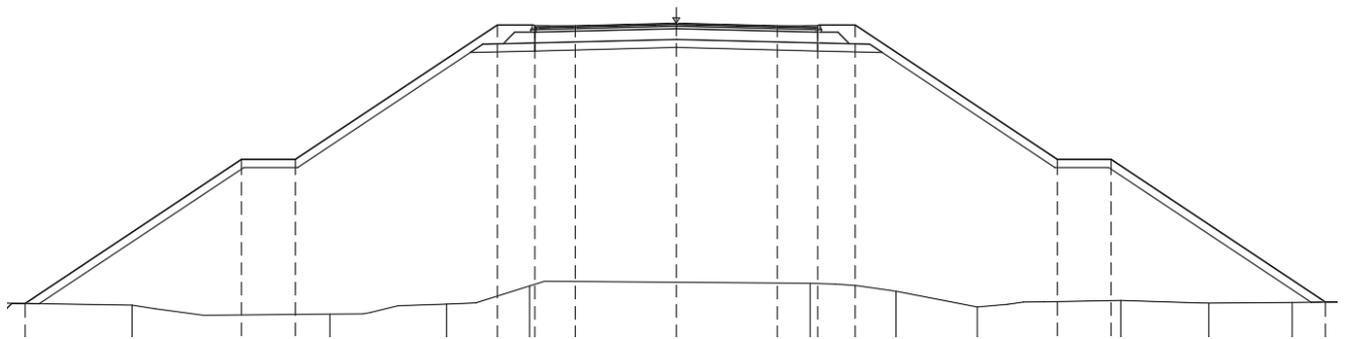


Figura 8.3.3: Sezione B1 del rilevato di approccio alla spalla B, tra pk 0+445 e pk 0+495

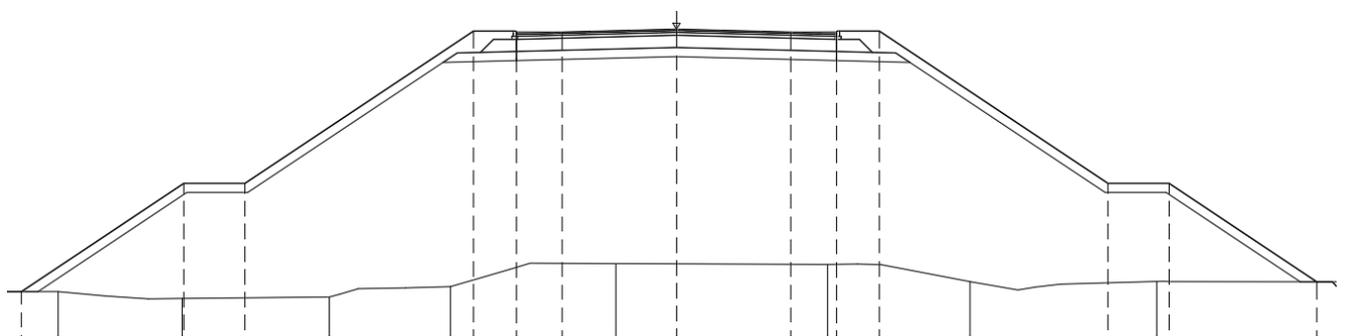


Figura 8.3.4: Sezione B2 del rilevato di approccio alla spalla B, tra pk 0+495 e pk 0+520

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

9. 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 Slide. Le combinazioni di carico adottate nelle analisi fanno riferimento rispettivamente ai coefficienti parziali (A2+M2) per le analisi in campo statico e ai valori caratteristici per le analisi sismiche.

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico stradale. Tra esse, è definita critica quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo. Come da NTC 2008, la verifica SLU di stabilità globale risulta soddisfatta quando la superficie di scivolamento più critica, tra tutte quelle cinematicamente possibili, ha un fattore di sicurezza pari almeno ad 1.1 in condizioni statiche assume lo stesso valore pari a 1.1 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 $\gamma_R=1.1$

essendo:

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

$R_d = R/\gamma_R$ valore di progetto della resistenza.

Nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore minore di 1 metro, considerate corticali e non rappresentative della situazione reale in quanto la scarpata verrà rifinita con la copertura a verde.

9.1 RISULTATI

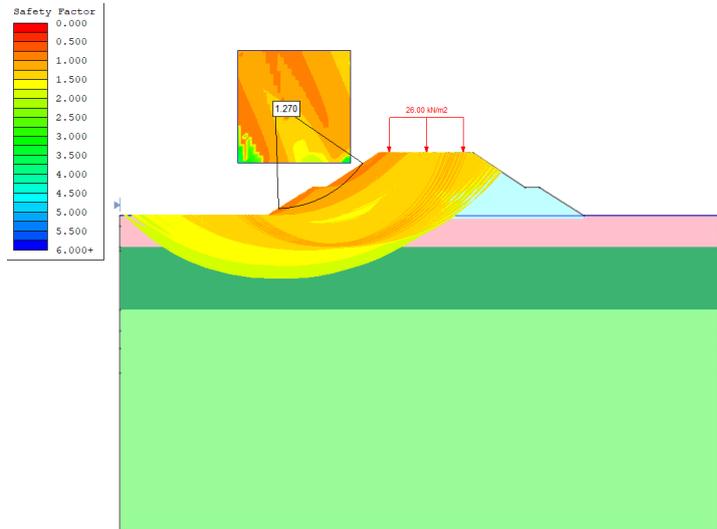
I risultati ottenuti nelle analisi di stabilità globale sono riportati in Tabella 8.1.1 insieme alle figure di riferimento. Si precisa che le analisi di stabilità sono state condotte non tenendo in conto la presenza delle inclusioni rigide.

Elemento	ANALISI	R/ E_d
Spalla A	STATICA	1.270
Spalla A	PSEUDOSTATICA	1.309
Spalla B	STATICA	1.212
Spalla B	PSEUDOSTATICA	1.271

Tabella 9.1.1: Risultati verifiche di stabilità globale dei rilevati di appoggio alla spalla A e B

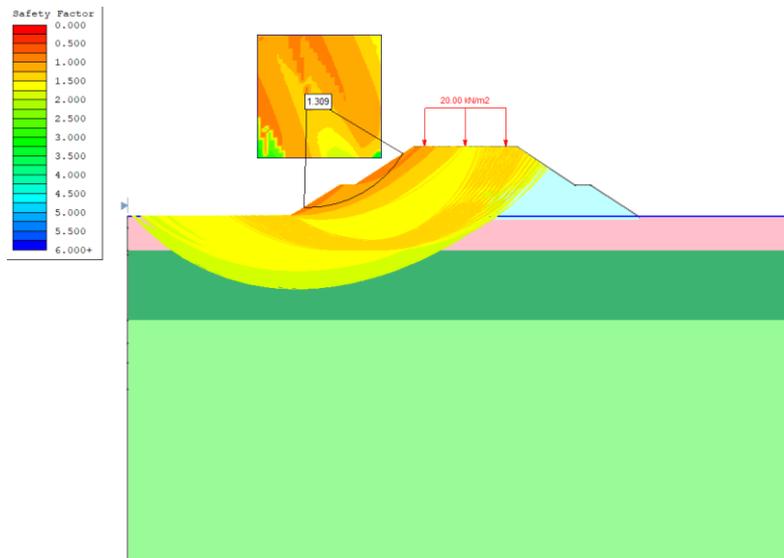
Le verifiche di stabilità globale in campo statico e sismico risultano soddisfatte.

	Progetto	Lotto	Codifica	
	IN17	12	EI2RBIV0400002	A



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Ru
Rilevato	■	19	Mohr-Coulomb	0	29.25		None	0
Limo/argilla 1	■	18.25	Undrained	37.5		Constant	None	0
Ghiaie con sabbia	■	19.5	Mohr-Coulomb	0	33.4		Piezometric Line 1	
Sabbia limosa	■	19.5	Mohr-Coulomb	0	32		Piezometric Line 1	

Figura 9.1.1: Spalla A. Rilevato H=9 m, - Analisi di stabilità globale in campo statico



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion Type	Water Surface	Ru
Rilevato	■	19	Mohr-Coulomb	0	35		None	0
Limo/argilla 1	■	18.25	Undrained	52.5		Constant	None	0
Ghiaie con sabbia	■	19.5	Mohr-Coulomb	0	39.5		Piezometric Line 1	
Sabbia limosa	■	19.5	Mohr-Coulomb	0	38		Piezometric Line 1	

Figura 9.1.2: Spalla A: Rilevato H=9 m, - Analisi di stabilità globale in campo sismico

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Progetto

Lotto

Codifica

IN17

12

EI2RBIV0400002

A

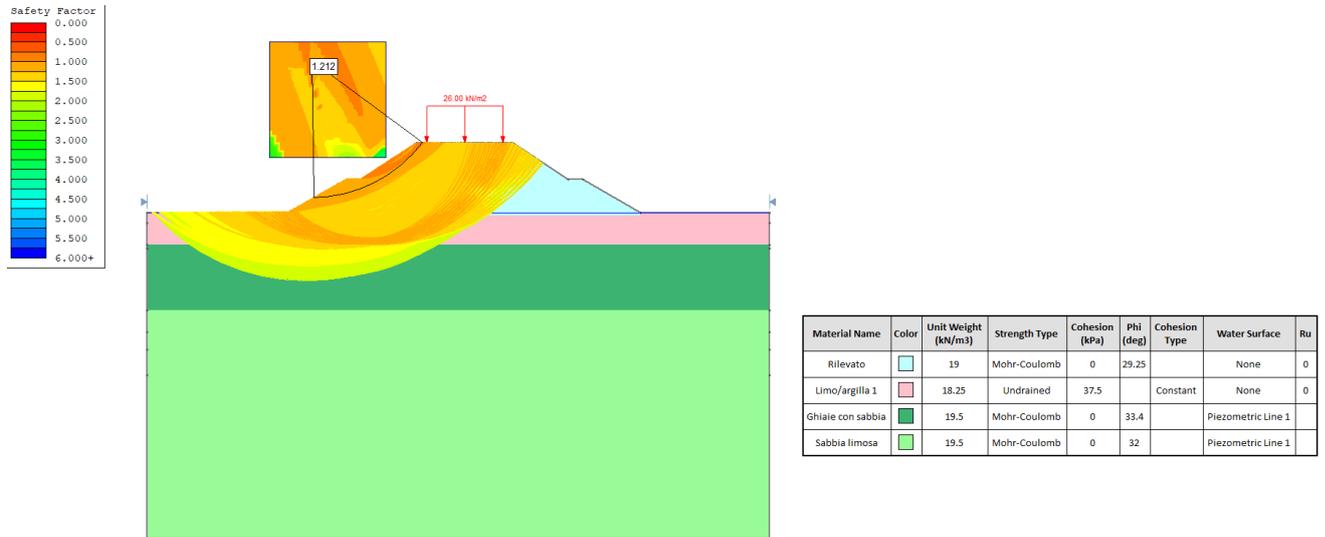


Figura 9.1.3: Spalla B. Rilevato H=9.6 m, - Analisi di stabilità globale in campo statico

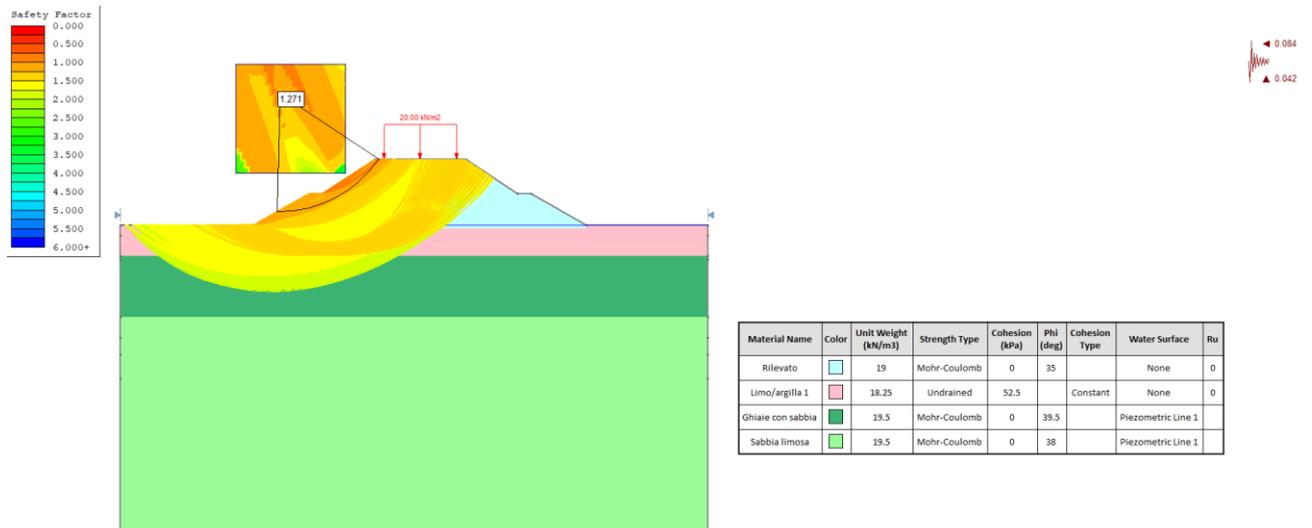


Figura 9.1.4: Spalla B: Rilevato H=9.6 m, - Analisi di stabilità globale in campo sismico

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

10. VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

10.1 MODELLI E RISULTATI

Le sezioni per le quali sono stati eseguiti i calcoli sono riportate nel paragrafo 7.3.

I dati di input adottati nella modellazione su Plaxis (stratigrafia, modello geotecnico di sottosuolo, caratteristiche del rilevato e carico del traffico) riportati nel capitolo 4.

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

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti:

- Generazione dello stato tensionale iniziale geostatico;
- Realizzazione del muro di sostegno su pali;
- Scotico dello strato superficiale;
- Esecuzione delle inclusioni rigide e del misto cementato di ricoprimento (6 mesi);
- Realizzazione rilevato (6 mesi);
- Applicazione del carico stradale;
- Consolidazione.

10.1.1 SEZIONE A1

La mesh di calcolo utilizzata per le analisi è mostrata nella Figura 9.1.1.1.

Per questa sezione, che fa riferimento ad uno sviluppo di rilevato di 50 m, ai fini del contenimento dei cedimenti, sono state considerate inclusioni rigide di lunghezza pari a 3 m. Tali inclusioni avranno un diametro di 0.6 m ed un interasse pari a 2.6 m.

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Progetto

Lotto

Codifica

IN17

12

EI2RBIV0400002

A

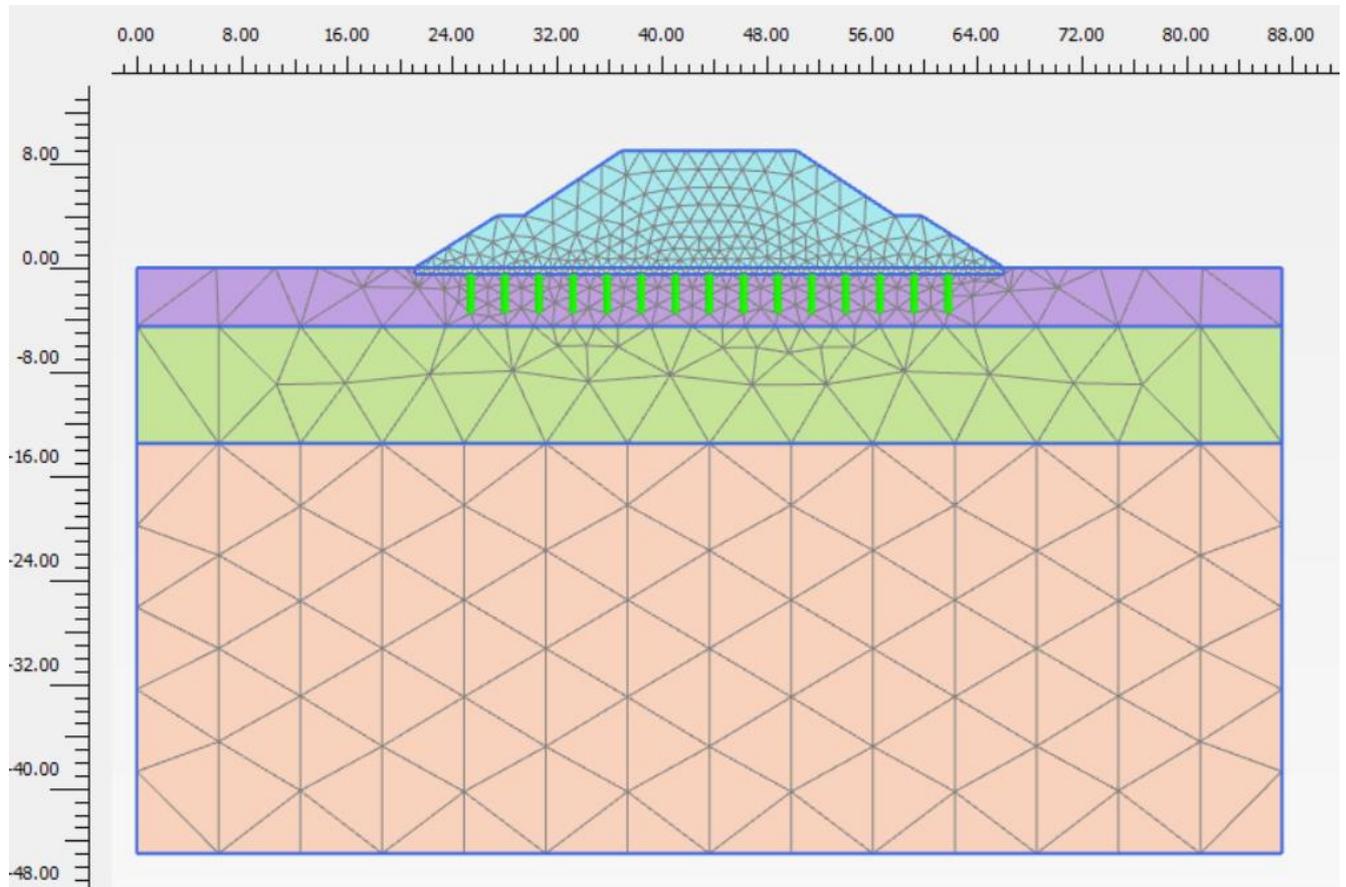


Figura 10.1.1.1: Modello rilevato sezione A1

In Figura 9.1.1.2 è riportata l'evoluzione nel tempo dello spostamento totale massimo in corrispondenza sia della base del rilevato che dell'asse stradale.

Come mostrato, al termine della costruzione del rilevato il cedimento è pari a circa 11 cm fino ad arrivare a circa 21 cm al termine della fase di consolidazione. Il cedimento di consolidazione risulta pertanto pari a 10 cm, il che può ritenersi accettabile con i requisiti di prestazionalità dell'opera.

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Progetto

Lotto

Codifica

IN17

12

EI2RBIV0400002

A

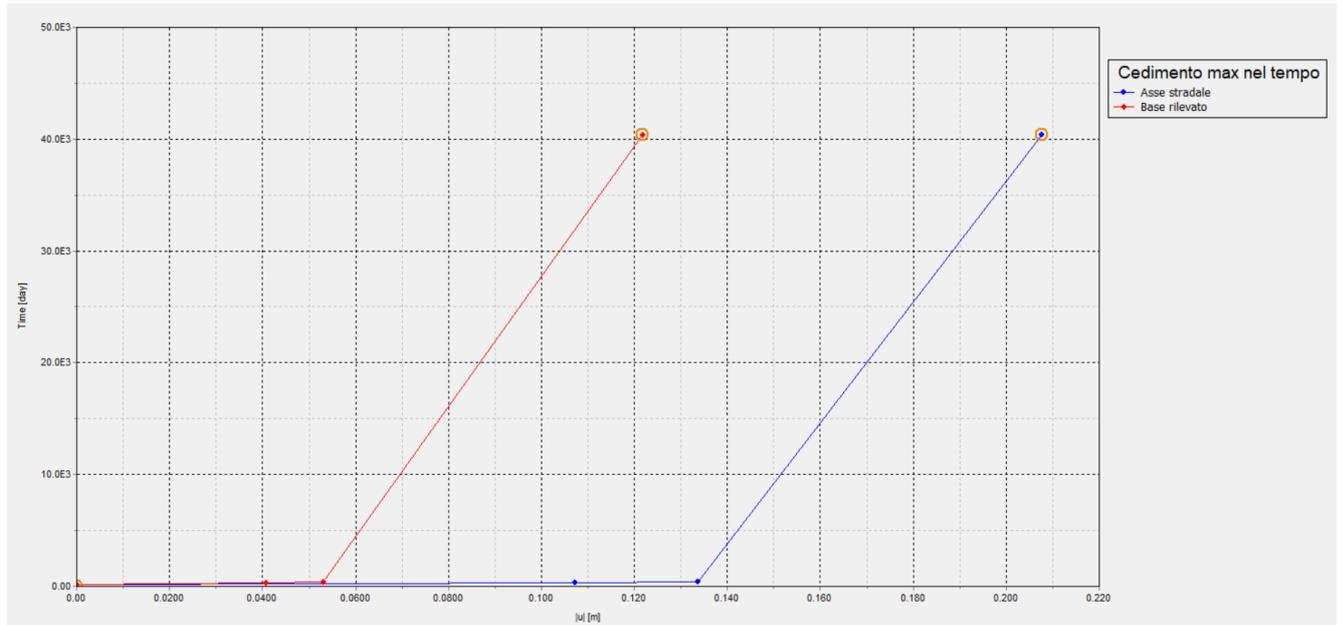


Figura 10.1.1.2: Rilevato sez. A1: Spostamenti totali in corrispondenza sia dell'asse stradale che della base del rilevato

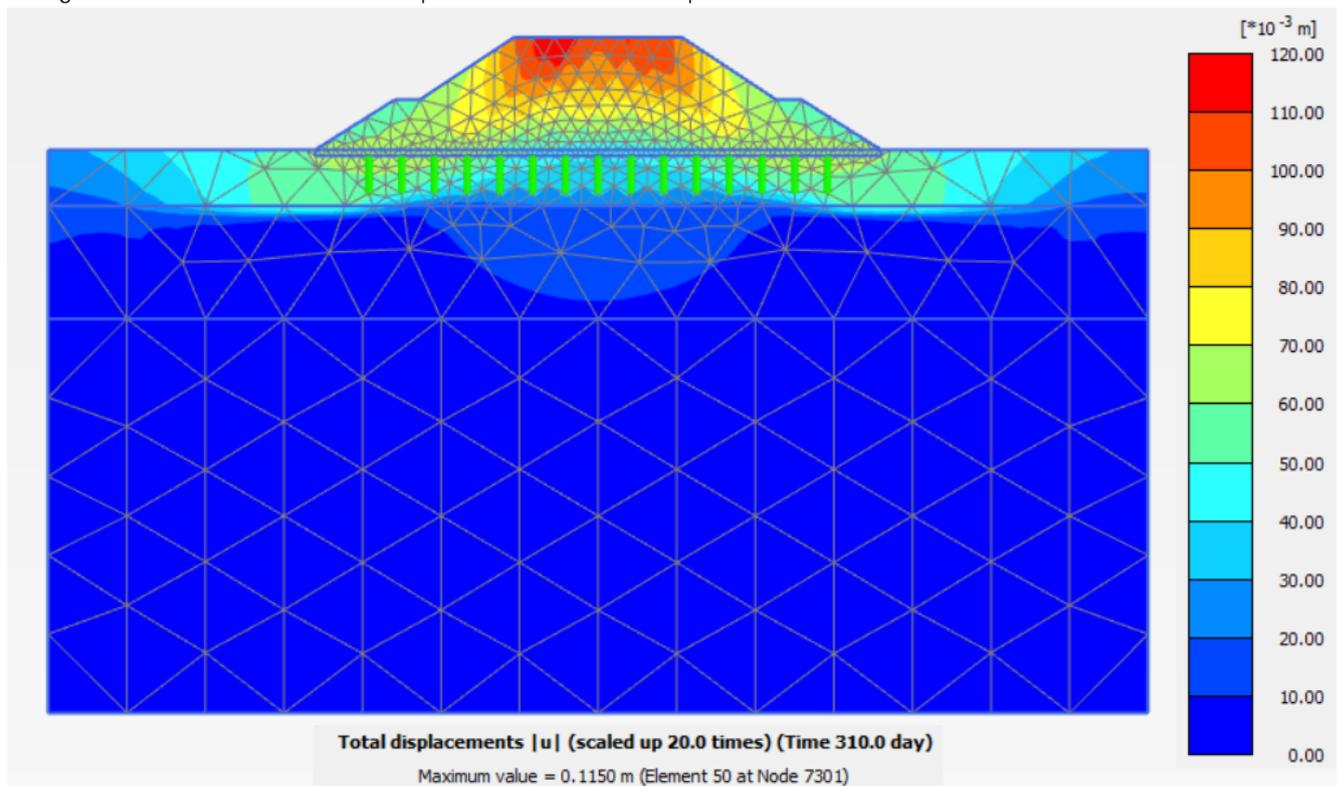


Figura 10.1.1.3: Rilevato sez. A1 - Spostamenti totali termine costruzione

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



	Progetto	Lotto	Codifica	
	IN17	12	EI2RBIV0400002	A

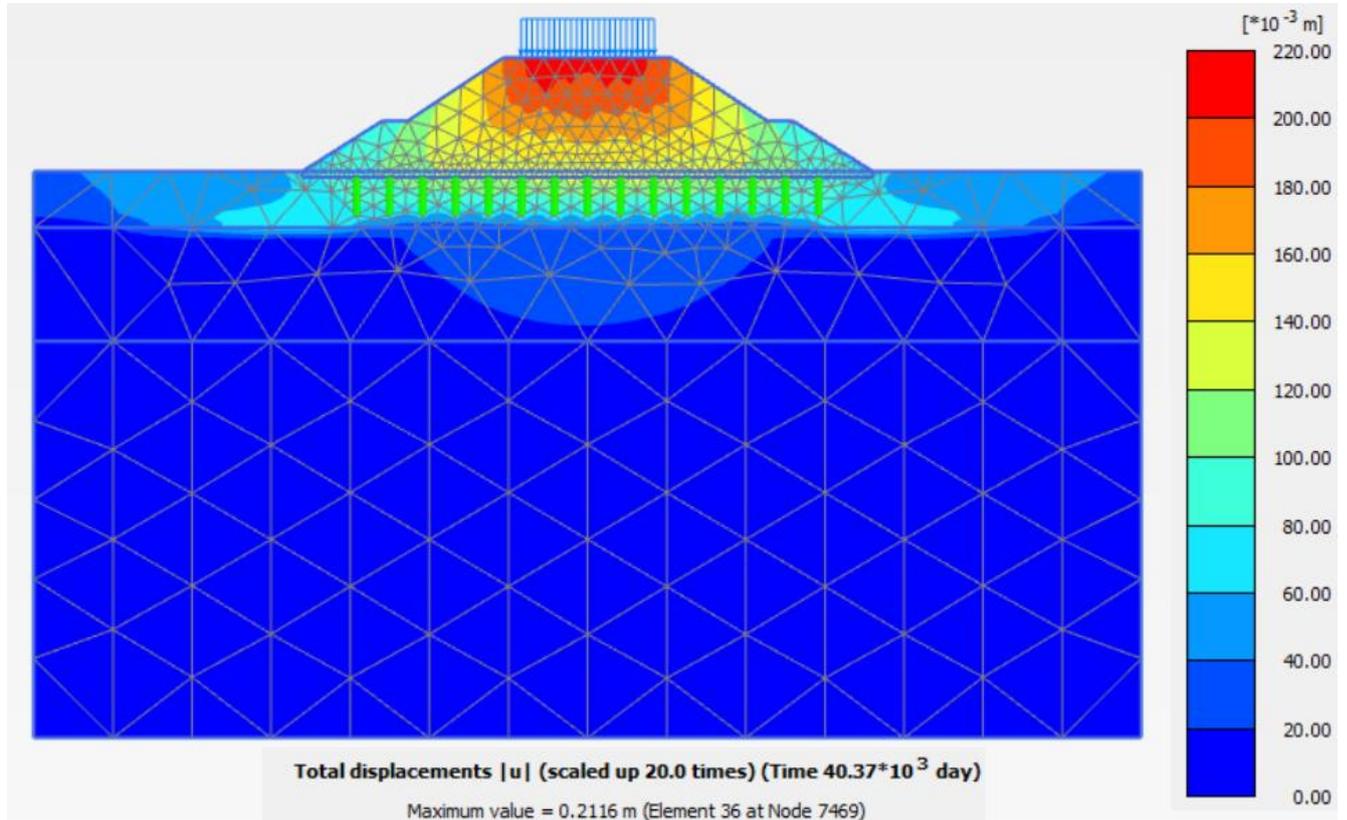


Figura 10.1.1.4: Rilevato sez. A1 - Spostamenti totali lungo termine

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

10.1.2 SEZIONE A2

La mesh di calcolo utilizzata per le analisi è mostrata nella Figura 9.1.2.1.

Per questa sezione, che fa riferimento ad uno sviluppo di rilevato di 25 m, ai fini del contenimento dei cedimenti, sono state considerate inclusioni rigide di lunghezza pari a 3 m. Tali inclusioni avranno un diametro di 0.6 m ed un interasse pari a 2.6 m.

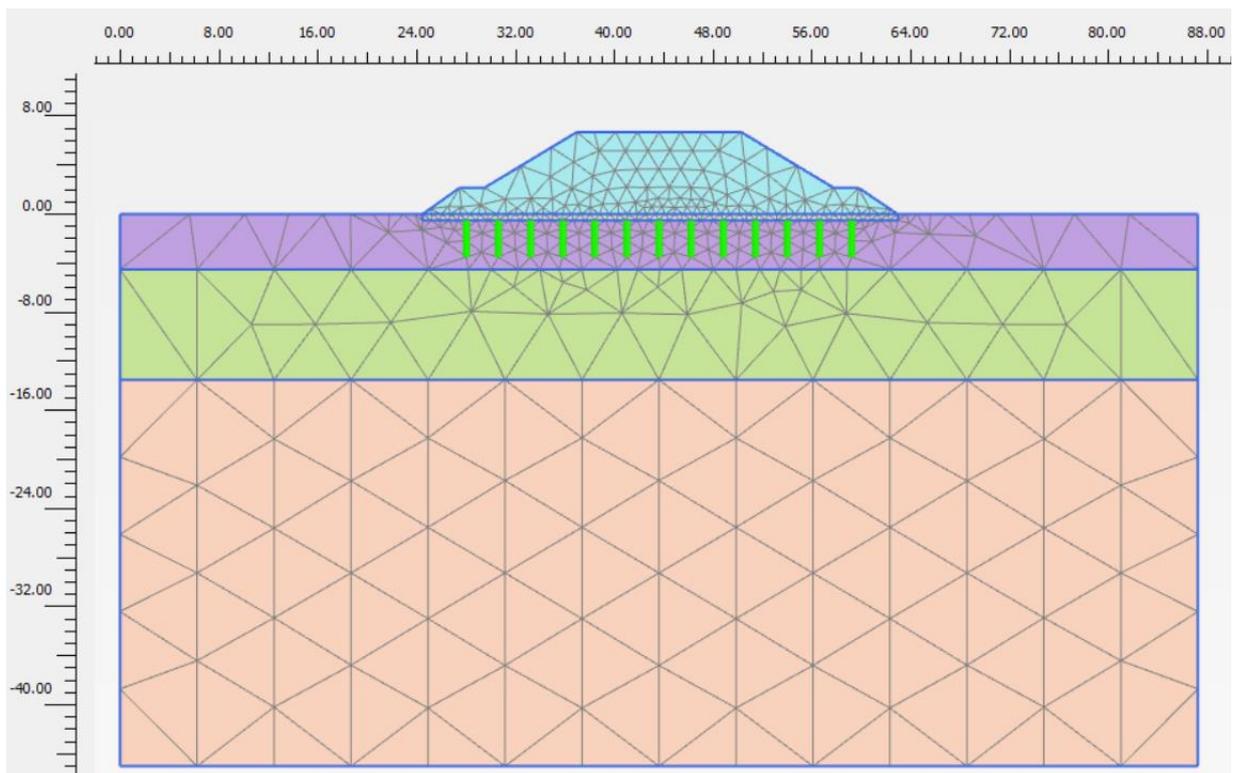


Figura 10.1.2.1: Modello rilevato sezione A2

In Figura 9.1.2.2 è riportata l'evoluzione nel tempo dello spostamento totale massimo in corrispondenza sia della base del rilevato che dell'asse stradale.

Come mostrato, al termine della costruzione del rilevato il cedimento è pari a circa 6 cm fino ad arrivare a circa 15 cm al termine della fase di consolidazione. Il cedimento di consolidazione risulta pertanto pari a 9 cm, il che può ritenersi accettabile con i requisiti di prestazionalità dell'opera.

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



	Progetto	Lotto	Codifica	
	IN17	12	EI2RBIV0400002	A

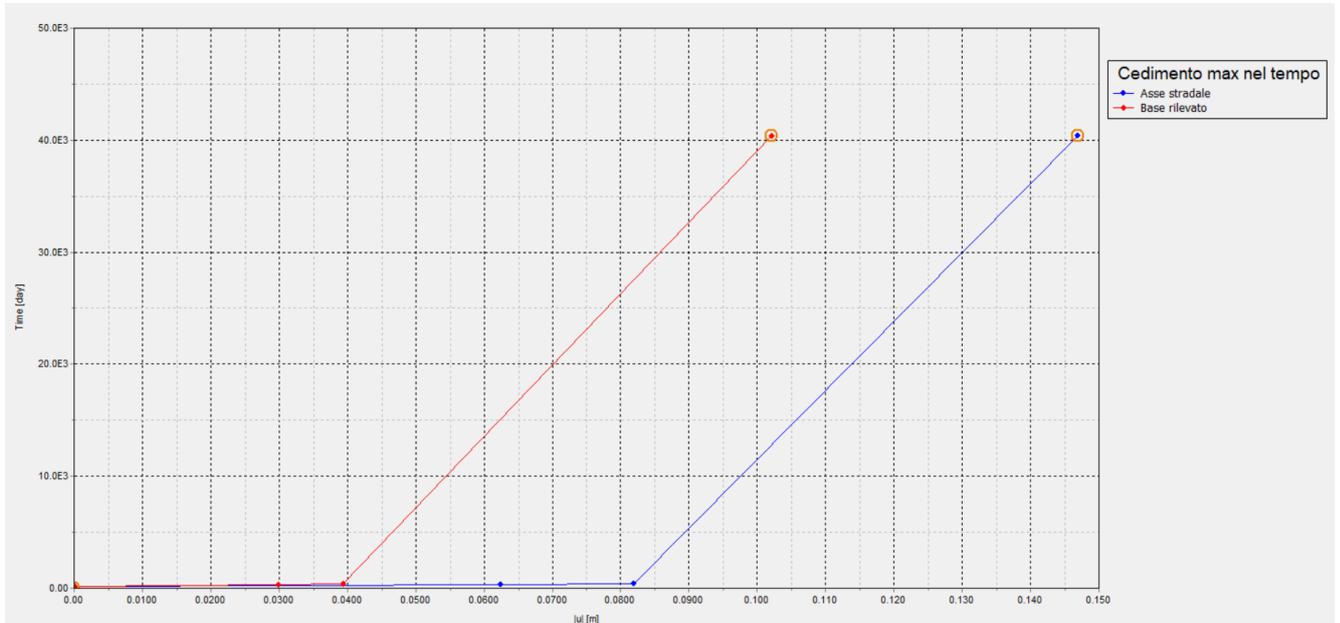


Figura 10.1.2.2: Rilevato sez. A2 – Spostamenti totali in corrispondenza sia dell'asse stradale che della base del rilevato

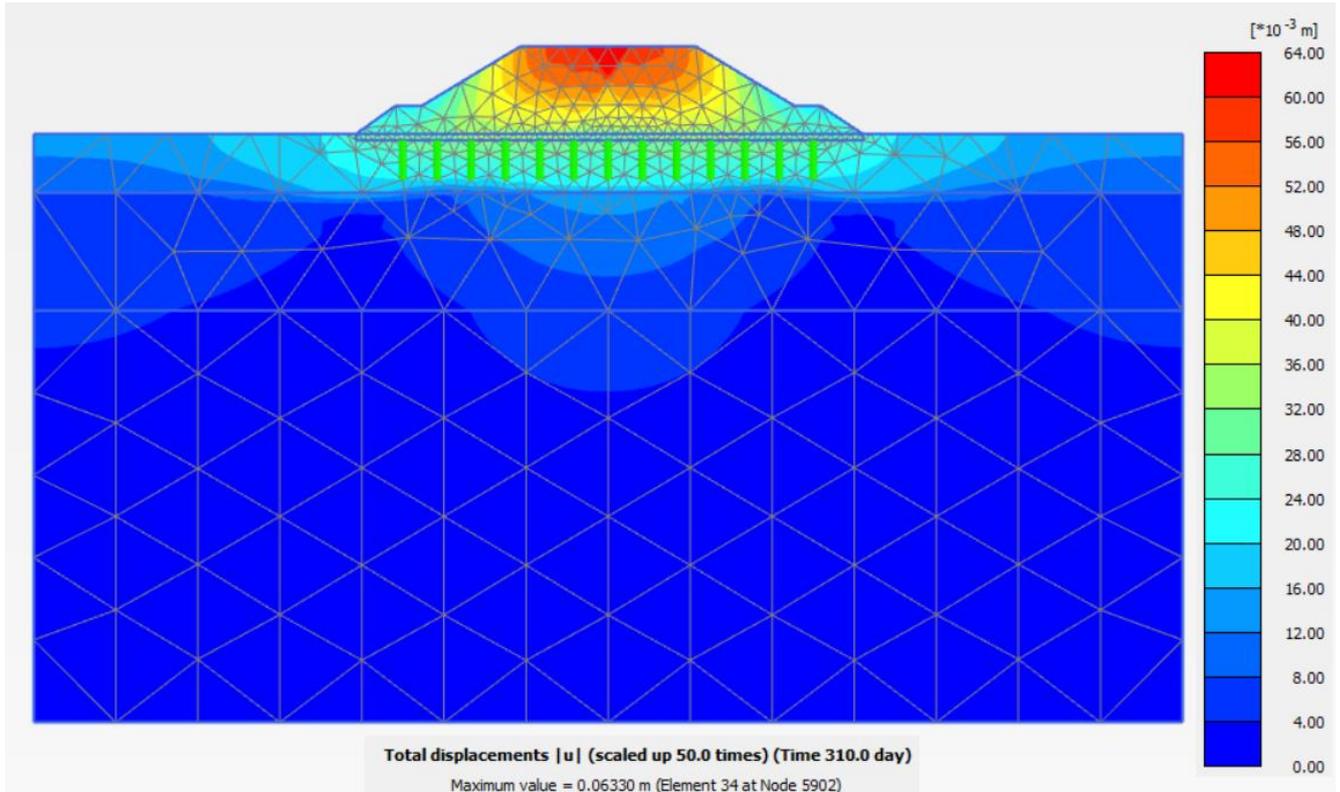


Figura 10.1.2.3: Rilevato sez. A2 – Spostamenti totali termine costruzione

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



	Progetto	Lotto	Codifica	
	IN17	12	EI2RBIV0400002	A

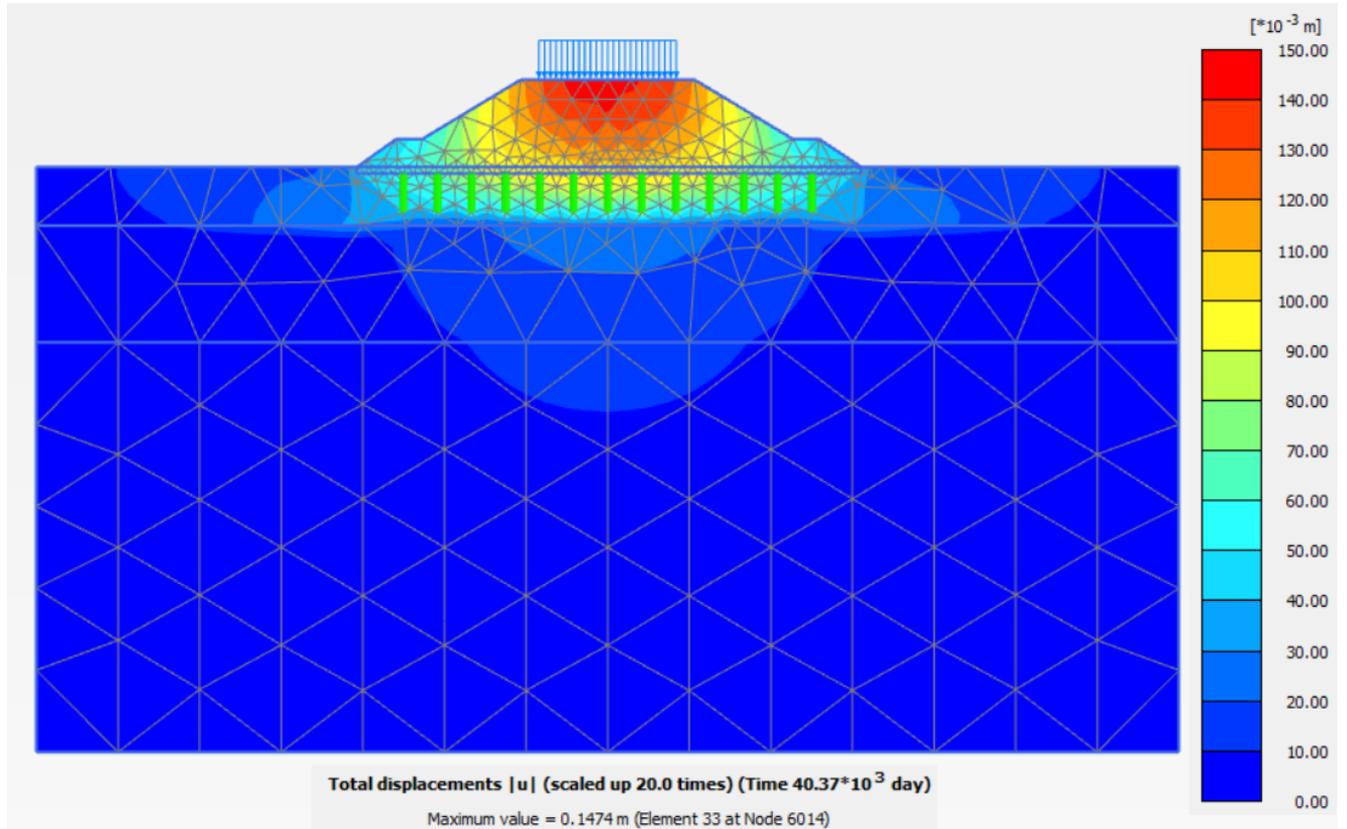


Figura 10.1.2.4: Rilevato sez. A2 – Spostamenti totali lungo termine

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

10.1.3 SEZIONE B1

La mesh di calcolo utilizzata per le analisi è mostrata nella Figura 9.1.3.1.

Per questa sezione, che fa riferimento ad uno sviluppo di rilevato di 50 m, ai fini del contenimento dei cedimenti, sono state considerate inclusioni rigide di lunghezza pari a 3 m. Tali inclusioni avranno un diametro di 0.6 m ed un interasse pari a 2.6 m.

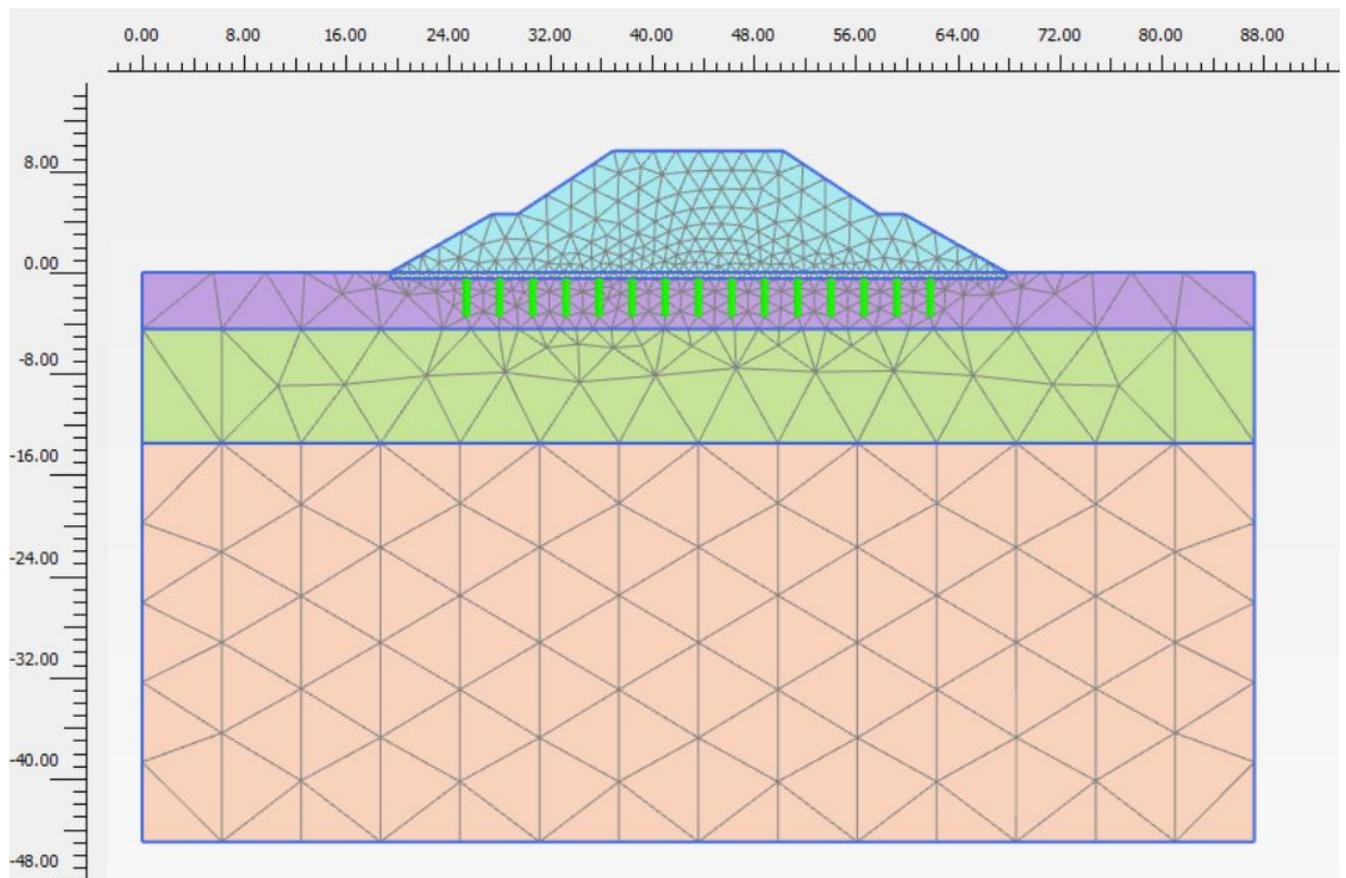


Figura 10.1.3.1: Modello rilevato sezione B1

In Figura 9.1.3.2 è riportata l'evoluzione nel tempo dello spostamento totale massimo in corrispondenza sia della base del rilevato che dell'asse stradale.

Come mostrato, al termine della costruzione del rilevato il cedimento è pari a circa 13 cm fino ad arrivare a circa 23 cm al termine della fase di consolidazione. Il cedimento di consolidazione risulta pertanto pari a 10 cm, il che può ritenersi accettabile con i requisiti di prestazionalità dell'opera.

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Progetto

IN17

Lotto

12

Codifica

EI2RBIV0400002

A

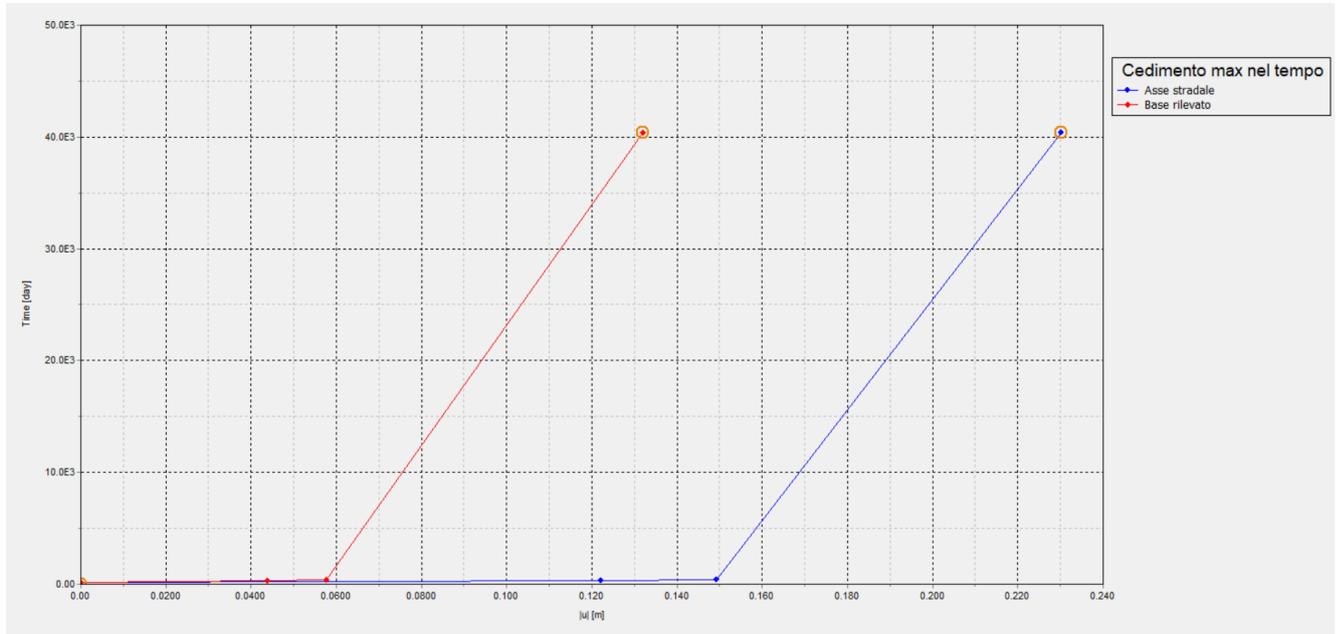


Figura 10.1.3.2: Rilevato sez. B1 – Spostamenti totali in corrispondenza sia dell’asse stradale che della base del rilevato

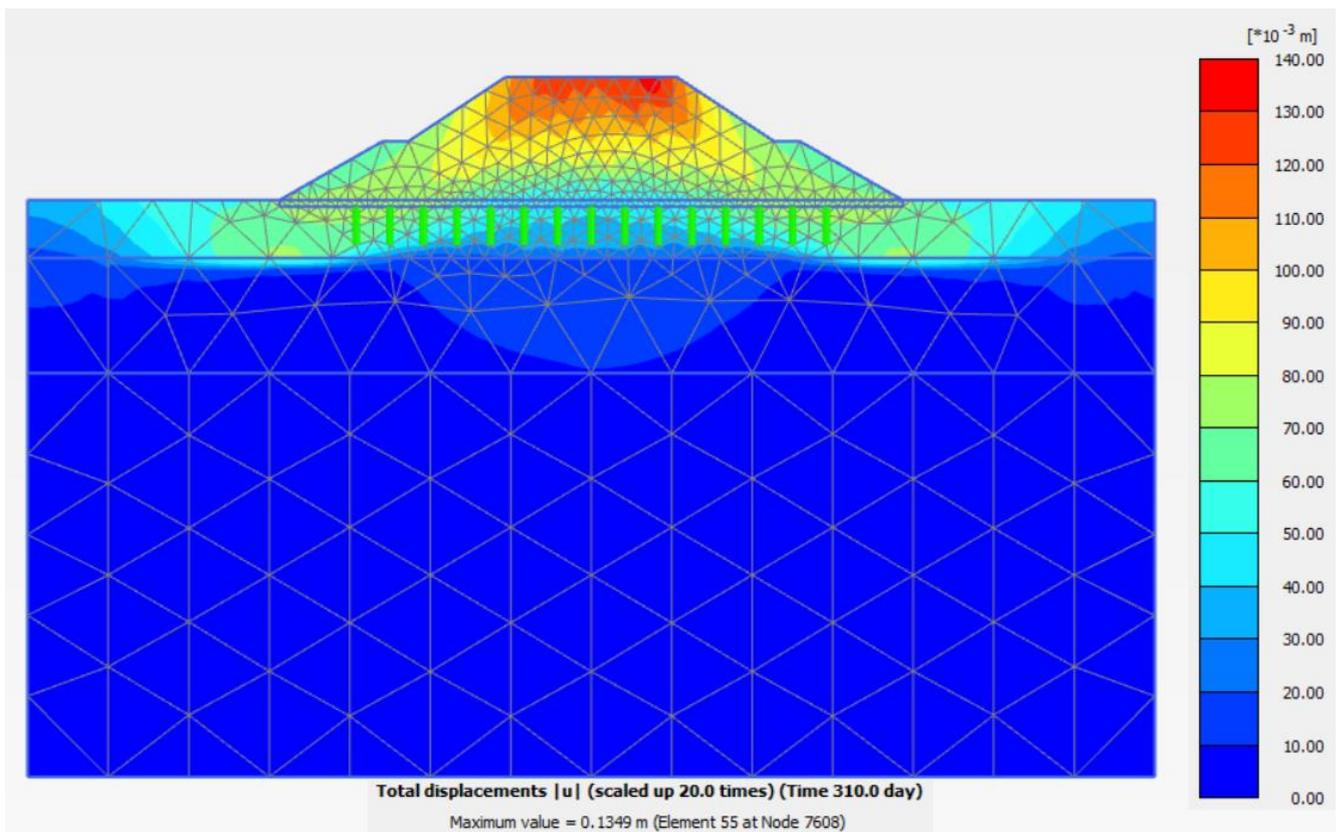


Figura 10.1.3.3: Rilevato sez. B1 – Spostamenti totali termine costruzione

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



	Progetto	Lotto	Codifica	
	IN17	12	EI2RBIV0400002	A

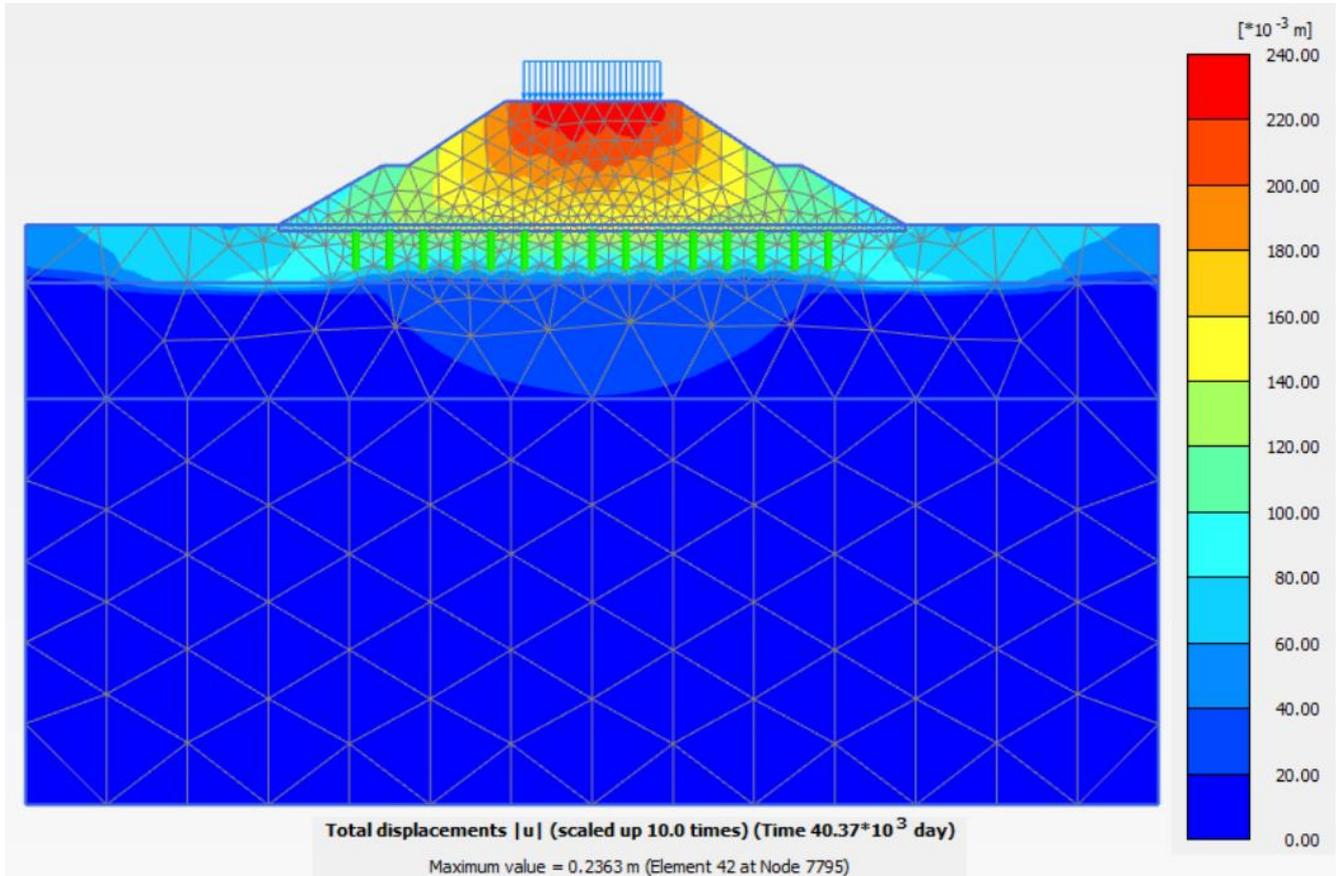


Figura 10.1.3.4: Rilevato sez. B1 – Spostamenti totali lungo termine

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

10.1.4 SEZIONE B2

La mesh di calcolo utilizzata per le analisi è mostrata nella Figura 9.1.4.1.

Per questa sezione, che fa riferimento ad uno sviluppo di rilevato di 25 m, ai fini del contenimento dei cedimenti, sono state considerate inclusioni rigide di lunghezza pari a 3 m. Tali inclusioni avranno un diametro di 0.6 m ed un interasse pari a 2.6 m.

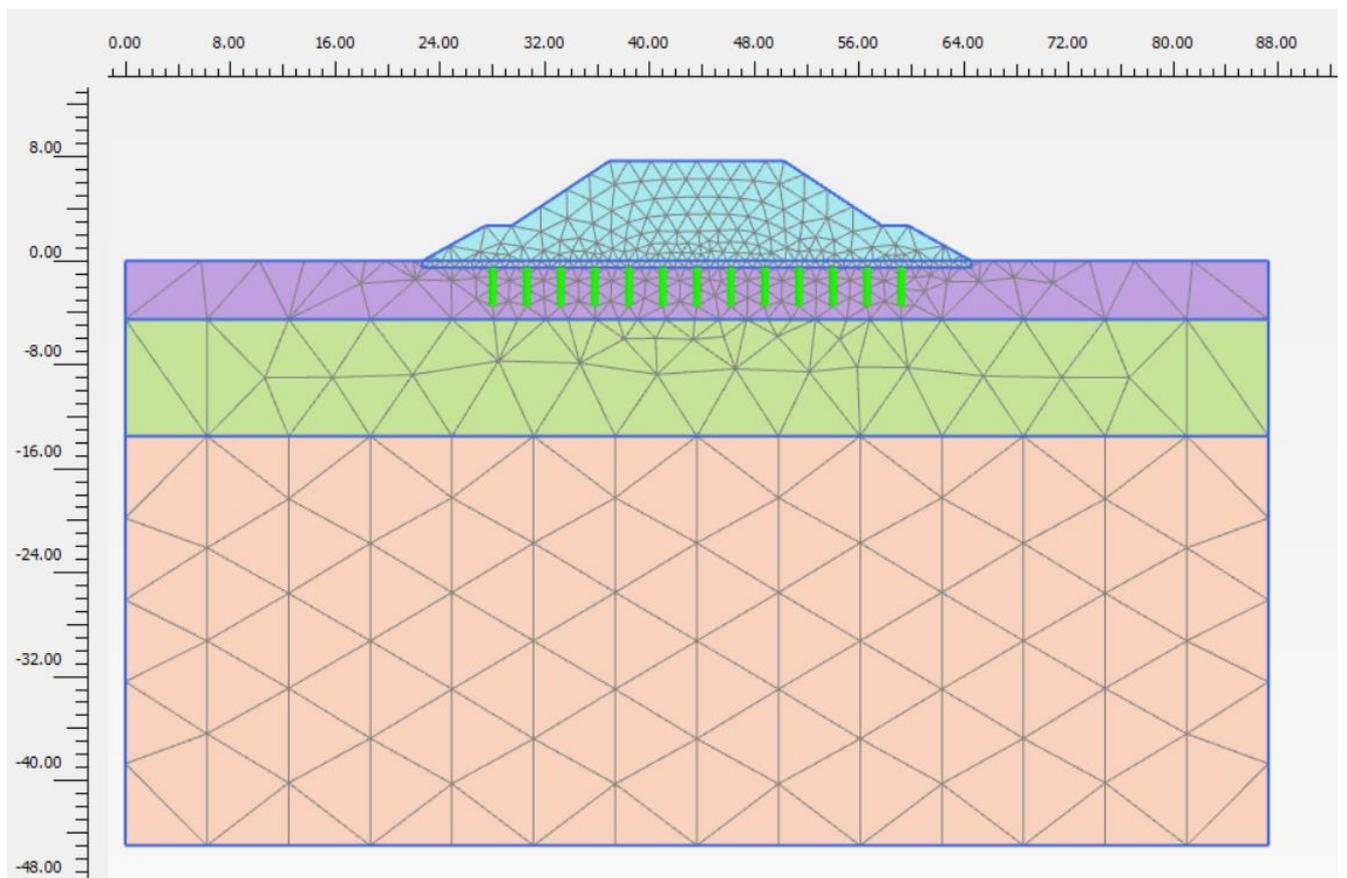


Figura 10.1.4.1: Modello rilevato sezione B2

In Figura 9.1.4.2 è riportata l'evoluzione nel tempo dello spostamento totale massimo in corrispondenza sia della base del rilevato che dell'asse stradale.

Come mostrato, al termine della costruzione del rilevato il cedimento è pari a circa 8 cm fino ad arrivare a circa 17 cm al termine della fase di consolidazione. Il cedimento di consolidazione risulta pertanto pari a 9 cm, il che può ritenersi accettabile con i requisiti di prestazionalità dell'opera.

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



	Progetto	Lotto	Codifica	
	IN17	12	EI2RBIV0400002	A

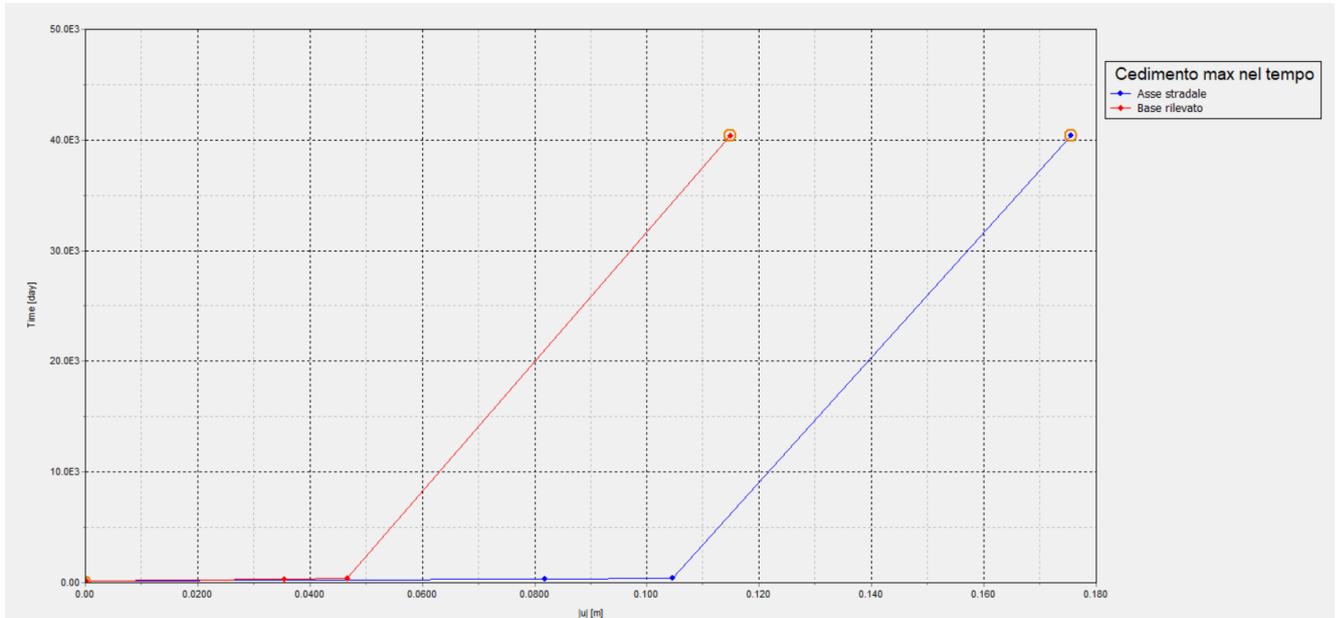


Figura 10.1.4.2: Rilevato sez. B2 – Spostamenti totali in corrispondenza sia dell’asse stradale che della base del rilevato

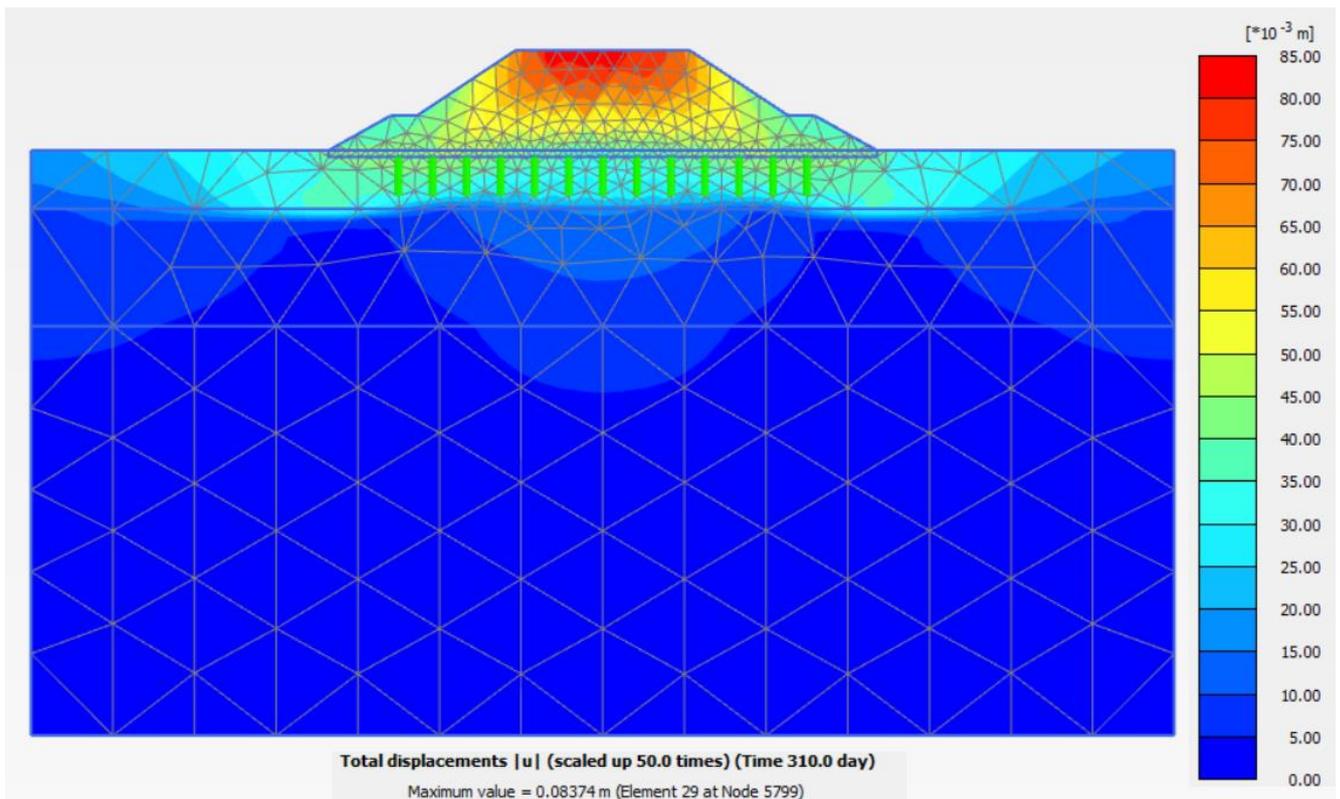


Figura 10.1.4.3: Rilevato sez. B2 – Spostamenti totali termine costruzione

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



	Progetto	Lotto	Codifica	
	IN17	12	EI2RBIV0400002	A

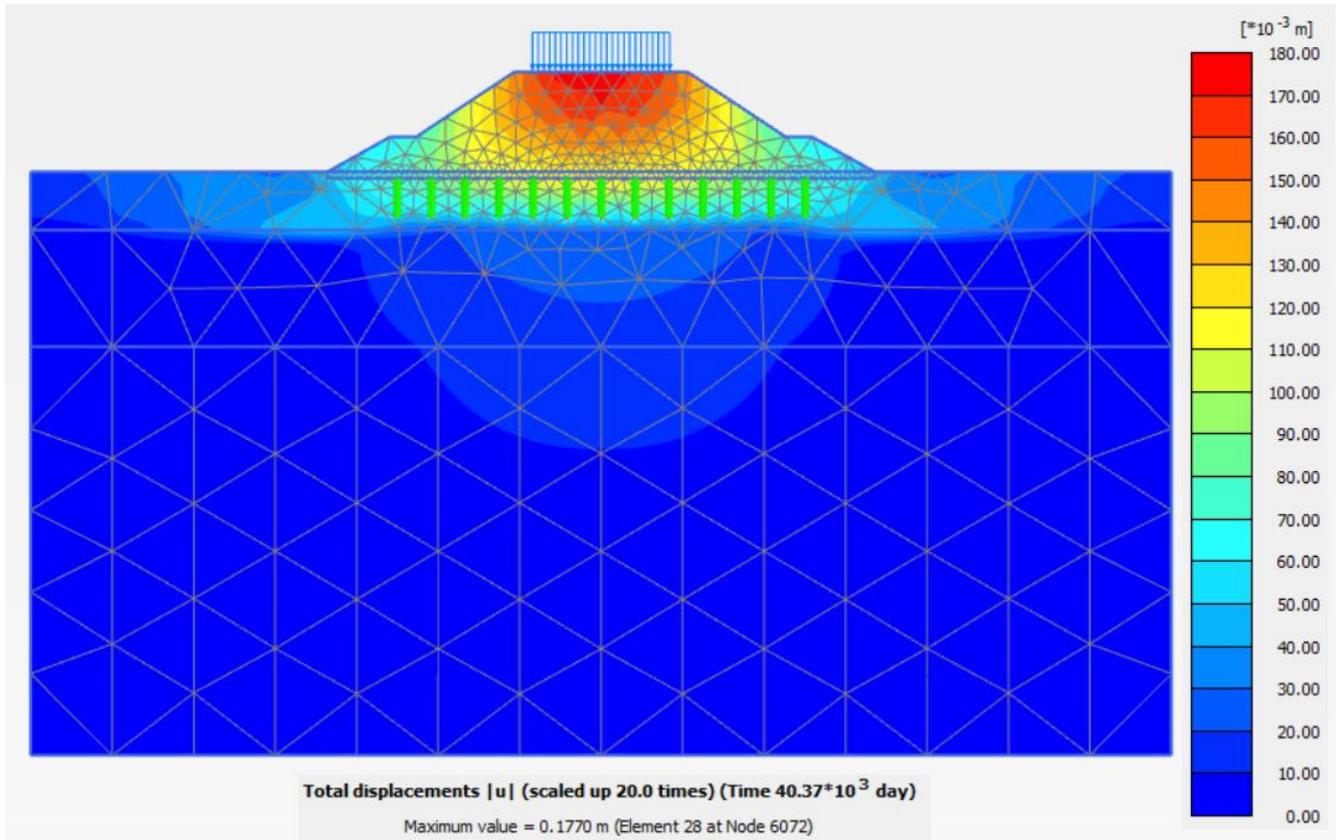


Figura 10.1.4.4: Rilevato sez. B2 – Spostamenti totali lungo termine

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 			
	Progetto IN17	Lotto 12	Codifica EI2RBIV0400002	A

11. CONCLUSIONI

I calcoli dei rilevati di approccio in condizioni SLE sono stati condotti tenendo conto della presenza di inclusioni rigide per contrastare la determinazione di cedimenti non ritenuti accettabili con la prestazionalità dell'opera, cedimenti legati non solo all'altezza dei rilevati (dell'ordine dei 9 m circa) ma anche alla compressibilità di alcuni strati di terreno presenti in corrispondenza della base dei rilevati stessi

Alla luce dei calcoli eseguiti e dei risultati raccolti, tenendo conto della variabilità dell'altezza dei rilevati lungo lo sviluppo longitudinale del viadotto (che raggiunge valori massimi proprio in corrispondenza delle spalle), l'intervento verrà realizzato secondo lo schema seguente:

- Spalla A: per i primi 50 m di sviluppo di rilevato saranno eseguite inclusioni rigide di lunghezza pari a 3 m; per i successivi 25 m la lunghezza delle inclusioni sarà sempre pari a 3 m; seguirà poi una zona di transizione di sviluppo di 8 m in cui le inclusioni avranno lunghezza pari a 2 m; infine oltre tali lunghezze non sarà più necessario eseguire l'intervento (Figura 11.1);
- Spalla B: per i primi 50 m di sviluppo di rilevato saranno eseguite inclusioni rigide di lunghezza pari a 3 m; per i successivi 25 m la lunghezza delle inclusioni sarà sempre pari a 3 m; seguirà poi una zona di transizione di sviluppo di 8 m in cui le inclusioni avranno lunghezza pari a 2 m; infine oltre tali lunghezze non sarà più necessario eseguire l'intervento (Figura 11.2).

Le verifiche di stabilità, invece, hanno restituito sempre coefficienti di sicurezza maggiori dei valori minimi dettati dalla normativa (sia in condizioni statiche che sismiche), pertanto, non saranno necessari interventi atti a mitigare problemi di instabilità dell'opera.

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Progetto

Lotto

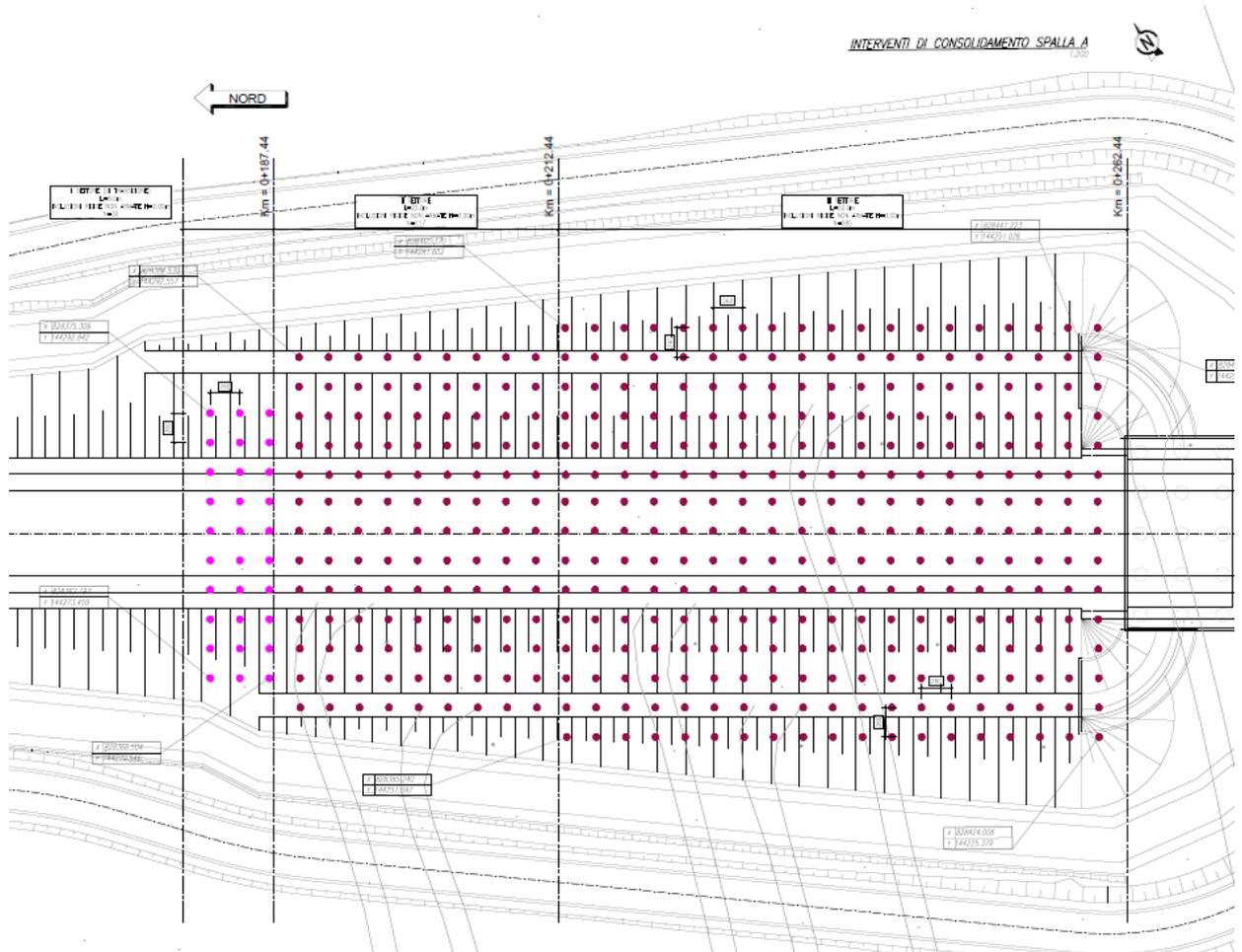
Codifica

IN17

12

EI2RBIV0400002

A



LEGENDA INCLUSIONI

- INCLUSIONI RIGIDE NON ARMATE L=7 METRI
- INCLUSIONI RIGIDE NON ARMATE L=6 METRI
- INCLUSIONI RIGIDE NON ARMATE L=2 METRI
- INCLUSIONI RIGIDE NON ARMATE L=3 METRI
- INCLUSIONI RIGIDE NON ARMATE L=4 METRI

Figura 11.1: Rilevato di approccio spalla A – Planimetria di progetto delle inclusioni rigide

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



Progetto

Lotto

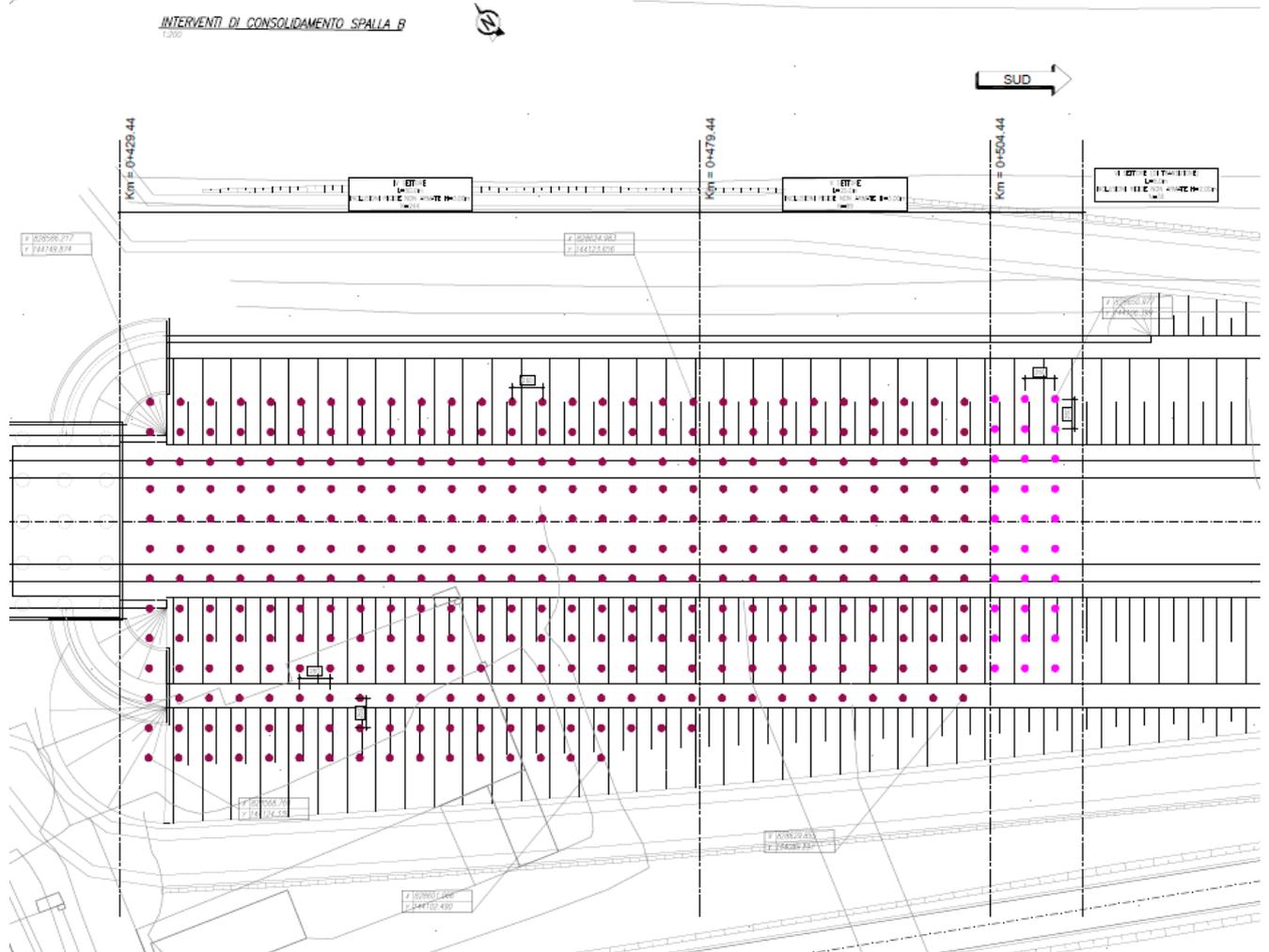
Codifica

IN17

12

EI2RBIV0400002

A



LEGENDA INCLUSIONI

- INCLUSIONI RIGIDE NON ARMATE L=7 METRI
- INCLUSIONI RIGIDE NON ARMATE L=6 METRI
- INCLUSIONI RIGIDE NON ARMATE L=2 METRI
- INCLUSIONI RIGIDE NON ARMATE L=3 METRI
- INCLUSIONI RIGIDE NON ARMATE L=4 METRI

Figura 11.2: Rilevato di approccio spalla B – Planimetria di progetto delle inclusioni rigide