



Autostrada Asti-Cuneo

TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
LOTTO 6 RODDI-DIGA ENEL

STRALCIO a
TRA IL LOTTO II.7 E LA PK. 5+000

PROGETTO DEFINITIVO

OPERE GEOTECNICHE

RILEVATI

RELAZIONE DI CALCOLO DEI RILEVATI

IMPRESA 	PROGETTISTA 	INTEGRATORE ATTIVITA' SPECIALISTICHE Dott. Ing. Salvatore Sguazzo Albo degli Ingegneri provincia di Salerno n. 5031 	COMMITTENTE Autostrada Asti-Cuneo S.p.A. Direzione e Coordinamento: S.A.L.T. p.A. (Gruppo ASTM) Via XX Settembre, 98/E 00187 Roma
--	--	--	---

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTR.	APPROV.	RIESAME	DATA	SCALA
A	05-2021	EMISSIONE	M.Trezzi	S.Corti	Ing. Sguazzo	Ing. Sguazzo	MAGGIO 2021	-
							N. Progr.	
							06.02.01	

CODIFICA	PROGETTO	LIV	DOCUMENTO	REV	WBS
	P017	D	OPG RC 001	A	A33126A000
					CUP
					G31B20001080005

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO	VISTO DELLA COMMITTENTE

Il presente documento non potrà essere copiato, riprodotto o altrimenti pubblicato, in tutto od in parte, senza il consenso scritto dell' Autostrada ASTI - CUNEO S.p.A.. Ogni utilizzo non autorizzato sarà perseguito a norma di legge. This document may not be copied, reproduced or published, either in part or in its entirety, without the written permission of Autostrada Asti - Cuneo S.p.A.. Unauthorized use will be persecute by law.

INDICE

1. INTRODUZIONE	6
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	7
2.1. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	7
2.2. DOCUMENTI DI PROGETTO	7
2.3. SOFTWARE	9
3. CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE	10
3.1. CRITERI GENERALI DI VERIFICA	10
3.1.1. <i>Stati limite di riferimento per le verifiche statiche</i>	11
3.2. VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER FRONTI DI SCAVO E RILEVATI	13
3.2.1. <i>Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche</i>	13
4. AZIONE SISMICA DI PROGETTO	15
4.1. COMPONENTI DELL'ACCELERAZIONE EQUIVALENTE	16
4.2. COEFFICIENTI SISMICI PER LA VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE PER LE VERIFICHE DEI FRONTI DI SCAVO E RILEVATI	16
5. CARATTERISTICHE GENERALI DELLE OPERE	17
5.1. DESCRIZIONE DEI TRATTI IN RILEVATO	17
5.2. MATERIALI ANTROPICI	19
5.3. CARICHI DI PROGETTO	19
6. METODOLOGIE DI VERIFICA E CODICI DI CALCOLO	20
6.1. METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE	20
6.1.1. <i>Verifiche di stabilità</i>	20
6.1.2. <i>Valutazione comportamento tensio-deformativo</i>	20
6.2. CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI	21
6.2.1. <i>Slope/W</i>	21
6.2.2. <i>Plaxis 2D</i>	21
7. RLV01	22
7.1. STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO	22
7.2. VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE	23
7.2.1. <i>Verifiche SLU in condizioni statiche</i>	23
7.2.2. <i>Verifiche SLU in condizioni sismiche</i>	24
7.3. VERIFICHE SLE	29
7.3.1. <i>Introduzione e descrizione interventi</i>	29
7.3.2. <i>Mesh, stratigrafia e falda</i>	29
7.3.3. <i>Modelli costitutivi e parametri geotecnici caratteristici</i>	29
7.3.4. <i>Carichi</i>	29

7.3.5.	<i>Condizioni al contorno</i>	29
7.3.6.	<i>Fasi di calcolo</i>	30
7.3.7.	<i>Risultati</i>	30
8.	RLV02	36
8.1.	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO	36
8.2.	VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE	37
8.2.1.	<i>Verifiche SLU in condizioni statiche</i>	37
8.2.2.	<i>Verifiche SLU in condizioni sismiche</i>	38
8.3.	VERIFICHE SLE	43
8.3.1.	<i>Introduzione e descrizione interventi</i>	43
8.3.2.	<i>Mesh, stratigrafia e falda</i>	43
8.3.3.	<i>Modelli costitutivi e parametri geotecnici caratteristici</i>	43
8.3.4.	<i>Carichi</i>	43
8.3.5.	<i>Condizioni al contorno</i>	43
8.3.6.	<i>Fasi di calcolo</i>	44
8.3.7.	<i>Risultati</i>	44
9.	RLV03	50
9.1.	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO	50
9.2.	VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE	51
9.2.1.	<i>Verifiche SLU in condizioni statiche</i>	51
9.2.2.	<i>Verifiche SLU in condizioni sismiche</i>	52
9.3.	VERIFICHE SLE	57
9.3.1.	<i>Introduzione e descrizione interventi</i>	57
9.3.2.	<i>Mesh, stratigrafia e falda</i>	57
9.3.3.	<i>Modelli costitutivi e parametri geotecnici caratteristici</i>	57
9.3.4.	<i>Carichi</i>	57
9.3.5.	<i>Condizioni al contorno</i>	57
9.3.6.	<i>Fasi di calcolo</i>	58
9.3.7.	<i>Risultati</i>	58
10.	RLV04	64
10.1.	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO	64
10.2.	VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE	65
10.2.1.	<i>Verifiche SLU in condizioni statiche</i>	66
10.2.2.	<i>Verifiche SLU in condizioni sismiche</i>	66
10.3.	VERIFICHE SLE	71
10.3.1.	<i>Introduzione e descrizione interventi</i>	71
10.3.2.	<i>Mesh, stratigrafia e falda</i>	73
10.3.3.	<i>Modelli costitutivi e parametri geotecnici caratteristici</i>	73
10.3.4.	<i>Carichi</i>	74
10.3.5.	<i>Condizioni al contorno</i>	74

10.3.6. Fasi di calcolo	74
10.3.7. Risultati	74
11. RLV05	81
11.1. STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO	83
11.2. VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE	85
11.2.1. Verifiche SLU in condizioni statiche.....	85
11.2.2. Verifiche SLU in condizioni sismiche	86
11.3. VERIFICHE SLE.....	95
11.3.1. Introduzione e descrizione interventi	95
11.3.2. Mesh, stratigrafia e falda.....	97
11.3.3. Modelli costitutivi e parametri geotecnici caratteristici.....	97
11.3.4. Carichi.....	98
11.3.5. Condizioni al contorno	98
11.3.6. Fasi di calcolo	98
11.3.7. Risultati	98
12. RLV06 E RLV07	110
12.1. STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO	112
12.2. STABILITÀ E DIMENSIONAMENTO DEI RINFORZI.....	114
12.2.1. Verifiche di sicurezza	114
12.2.2. Scorrimento.....	114
12.2.3. Stabilità interna e stabilità globale	115
12.2.4. Risultati	116
12.3. VERIFICHE SLE.....	133
12.3.1. Introduzione e descrizione interventi	133
12.3.2. Mesh, stratigrafia e falda.....	136
12.3.3. Modelli costitutivi e parametri geotecnici caratteristici.....	136
12.3.4. Carichi.....	137
12.3.5. Condizioni al contorno	137
12.3.6. Fasi di calcolo	137
12.3.7. Risultati	137
13. RLV08	150
13.1. STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO	151
13.2. VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE	152
13.2.1. Verifiche SLU in condizioni statiche.....	152
13.2.2. Verifiche SLU in condizioni sismiche	153
13.3. VERIFICHE SLE.....	162
13.3.1. Introduzione e descrizione interventi	162
13.3.2. Mesh, stratigrafia e falda.....	164
13.3.3. Modelli costitutivi e parametri geotecnici caratteristici.....	164
13.3.4. Carichi.....	165

13.3.5. Condizioni al contorno	165
13.3.6. Fasi di calcolo	165
13.3.7. Risultati	165
14. MONITORAGGIO	177
14.1. FINALITÀ DEL MONITORAGGIO.....	177
14.2. MISURA DEGLI ASSESTAMENTI DEL TERRENO	177
14.2.1. Scopo	177
14.2.2. Descrizione della strumentazione e modalità di installazione	177
14.2.3. Frequenza dei rilevamenti.....	177
14.2.4. Modalità di misura	178
14.2.5. Restituzione dati.....	178
14.3. SEZIONI DI MONITORAGGIO.....	178
14.3.1. Sezione di monitoraggio tipo.....	178

1. INTRODUZIONE

La seguente relazione riguarda lo studio dal punto di vista geotecnico dei tratti in rilevato del Collegamento autostradale Asti-Cuneo, Tronco II - Lotto 6 (Roddi-Diga ENEL), stralcio "A", ove questi necessitano di interventi di stabilizzazione e/o riduzione dei cedimenti. In particolare, il presente documento riporta le verifiche ai sensi della Normativa vigente (Doc. Rif.[6]) relative alle sezioni caratteristiche dei suddetti tratti in rilevato, con il dimensionamento geotecnico degli interventi.

Non sono oggetto di questo documento le valutazioni sui tratti in rilevato ove questi non necessitano di interventi di stabilizzazione e/o riduzione dei cedimenti.

Il documento è così articolato:

- Nel Cap.2 si riportano i documenti di riferimento, la normativa e gli elaborati di progetto citati nel testo.
- Nel Cap.3 si descrivono i criteri generali di progettazione in accordo alla Normativa vigente (Doc. Rif. [6.]).
- Nel Cap. 4 si definisce l'azione sismica di progetto.
- Nel Cap.5 si riporta la descrizione del corpo stradale da un punto di vista geometrico, si elencano le sezioni di calcolo, le caratteristiche dei materiali antropici utilizzati per i rilevati e si descrivono i carichi di progetto.
- Nel Cap. 6 si descrivono i criteri di verifica ed i codici di calcolo adottati.
- Nei successivi capitoli da 7 a 13, per ogni sezione di rilevato studiata sono invece riportate le descrizioni degli interventi e della stratigrafia di progetto. Sono inoltre descritti i risultati delle verifiche redatte ai sensi delle NTC2018. Per quanto riguarda la valutazione dei cedimenti, questi possono essere utilizzati per stimare indicativamente le quantità di materiale di riporto integrative per ripristinare le quote di progetto durante le fasi di costruzione del rilevato.
- Nel Cap. 14 si riportano le indicazioni per il monitoraggio.

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- [1.] D.G.R. 3 febbraio 2012, n. 7-3340: Modifiche e integrazioni alle procedure di controllo e gestione delle attività urbanistico-edilizie ai fini della prevenzione del rischio sismico approvate con D.G.R. n. 4-3084 del 12/12/2011.
- [2.] D.G.R. 12 dicembre 2011, n. 4-3084: D.G.R. n. 11-13058 del 19/01/2010. Approvazione delle procedure di controllo e gestione delle attività urbanistico-edilizie ai fini della prevenzione del rischio sismico attuative della nuova classificazione sismica del territorio piemontese.
- [3.] D.G.R. 18 febbraio 2011, n. 8-1517: Modifica del termine di entrata in vigore della nuova classificazione sismica del territorio piemontese come approvata con D.G.R. n. 11-13058 del 19/01/2010 e ulteriori disposizioni pubblicato su Bollettino Ufficiale Regione Piemonte n. 8 del 24/02/2011.
- [4.] D.G.R. 1 marzo 2010, n. 28-13422: Differimento del termine di entrata in vigore della nuova classificazione sismica del territorio piemontese approvata con D.G.R. n. 11-13058 del 19/01/2010 e ulteriori disposizioni pubblicato su Bollettino Ufficiale Regione Piemonte n. 10 del 11/03/2010.
- [5.] D.G.R. 19 gennaio 2010, n. 11-13058: Aggiornamento ed adeguamento dell'elenco delle zone sismiche (O.P.C.M. n. 3274/2003 e O.P.C.M. 3519/2006) pubblicato su Bollettino Ufficiale Regione Piemonte n. 7 del 18/02/2010.
- [6.] N.T.C. 2018: Testo unitario – Norme Tecniche per le Costruzioni.
- [7.] O.P.C.M. 3519 del 28/04/2006 (G.U. 11.5.2006 n.108). Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone.
- [8.] O.P.C.M. 3274 del 20/03/2003 (Supplemento ordinario alla G.U. 8.5.2003 n.105). Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.

2.2. DOCUMENTI DI PROGETTO

Collegamento autostradale Asti–Cuneo – Tronco Il Lotto 6 – Stralcio “A”, Progetto Definitivo, elaborati di progetto:

- [9.] P017_D_STU_GEO02_RB_001_A Relazione geotecnica generale
- [10.] P017_D_STU_GEO02_FT_001_A Profilo geotecnico - Tav. 1
- [11.] P017_D_STU_GEO02_FT_002_A Profilo geotecnico - Tav. 2
- [12.] P017_D_STU_GEO02_FT_003_A Profilo geotecnico - Tav. 3
- [13.] P017_D_STU_SMC00_RH_001_A Relazione sismica
- [14.] P017_D_OPG_RLV00_PZ_001/2/3/4_A Planimetria e sezioni degli interventi di consolidamento per RLV01/2/3/4
- [15.] P017_D_OPG_RLV00_PZ_005_A Planimetria degli interventi di consolidamento per RLV05
- [16.] P017_D_OPG_RLV00_PZ_006_A Sezioni degli interventi di consolidamento per RLV05
- [17.] P017_D_OPG_RLV00_PZ_007_A Planimetria dei rilevati in terra rinforzata per RLV06 e RLV07
- [18.] P017_D_OPG_RLV00_PZ_008/9_A Sezioni dei rilevati in terra rinforzata per RLV06 e RLV07

- [19.] P017_D_OPG_RLV00_PZ_010_A Planimetria e sezioni degli interventi di consolidamento per il rilevato in terra rinforzata RLV07
- [20.] P017_D_OPG_RLV00_PZ_011_A Planimetria e sezioni degli interventi di consolidamento per rilevato in terra rinforzata RLV08

2.3. SOFTWARE

- [21.] Slope\W – GeoSlope (www.geo-slope.com)
- [22.] PLAXIS B.V.. “Plaxis – Finite Element Code for Soil and Rock Analyses”. Professional Vers. 8.2. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherland. ([http:// w.plaxis.nl](http://w.plaxis.nl))
- [23.] MACSTARS W rel. 3.0 (Officine Maccaferri S.p.A.) – Terre rinforzate

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. 6.2.4. del Doc. Rif.[6.]).

Verifiche agli Stati Limite Ultimi (SLU);

Verifiche agli Stati Limite d'Esercizio (SLE).

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

$$E_d \leq R_d \quad (\text{Eq. 6.2.1 del Doc. Rif.}[6.])$$

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. 6.2.4.1 Doc. Rif.[6.]).

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

$$E_d \leq C_d \quad (\text{Eq. 6.2.7 del Doc. Rif.}[6.])$$

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.

Verifiche di sicurezza in campo statico per opere in materiali sciolti e fronti di scavo

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.

3.1.1. Stati limite di riferimento per le verifiche statiche

3.1.1.1. 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.[6.]):

Approccio 1:

Combinazione 2: A2 + M2 + R2

tenendo conto dei coefficienti parziali riportati in Doc. Rif.[6.].

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 in accordo con quanto definito nelle istruzioni per l'applicazione delle NTC2018, 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.

Tabella 1: Coefficienti parziali sulle azioni (A1, A2 e EQU) - (Tab. 6.2.I, Doc. Rif.[6.].)

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	0.9	1.0	1.0
	Sfavorevole		1.1	1.3	1.0
Permanenti non strutturali	Favorevole	γ_{G2}	0.0	0.0	0.0
	Sfavorevole		1.5	1.5	1.3
Variabili	Favorevole	γ_{Qi}	0.0	0.0	0.0
	Sfavorevole		1.5	1.5	1.3

Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. i carichi permanenti portati) siano completamente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti

Tabella 2: Coefficienti parziali sui terreni (M1 ed M2) - (Tab. 6.2.II, Doc. Rif. [6.])

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

Tabella 3: Coefficienti parziali per le verifiche di stabilità globale in campo statico (R2) - (Tab. 6.8.I, Doc. Rif.[6.]).

Coefficiente parziale	(R2)
γ_R	1.1

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

3.2. VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER FRONTI DI SCAVO E RILEVATI

3.2.1. Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche

Le NTC-2018 (Doc. Rif.[6.]) 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. [6.]:

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):

- 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.

Lo stato limite da considerare in funzione della verifica di sicurezza appropriata per l'opera viene determinato in funzione della classe d'uso della struttura, come definito nelle istruzioni per l'applicazione delle NTC2018.

Con riferimento all'opera in oggetto, e considerando quanto riportato nelle istruzioni per l'applicazione delle NTC2018, 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.

Tabella 4: Verifiche di sicurezza in funzione della Classe d'uso secondo le istruzioni per l'applicazione delle NTC2018.

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

3.2.1.1. 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. [6.]). Per i rilevati 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.[6.]). 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. [6.], le verifiche possono essere condotte mediante metodi pseudo statici, metodi degli spostamenti e metodi di analisi dinamica.

4. AZIONE SISMICA DI PROGETTO

Con il fine di fornire un inquadramento complessivo dell'azione sismica lungo il tracciato di progetto, nella Relazione Sismica sono stati individuati sette punti di interesse tra i quali:

- tre punti lungo il tracciato sede delle opere (inizio, metà e fine tracciato).
- comuni attraversati dal tracciato (comune di Cherasco, La Morra, Verduno e Roddi).

La definizione dell'azione sismica di progetto per le opere afferenti il tracciato è stata condotta secondo quanto disposto dalle Norme Tecniche in vigore assunte alla base della progettazione in oggetto (Doc. Rif. [6.])

In particolare, l'azione sismica in base alla quale va valutato il rispetto dei diversi Stati Limite per le strutture in progetto (di esercizio – SLE e Ultimi - SLU) deve essere definita a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione, a sua volta espressa in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su suolo rigido, con superficie topografica orizzontale.

La definizione dell'azione sismica comprende la determinazione delle ordinate dello spettro di risposta elastica in accelerazione $S_e(T)$ “ancorato” al valore di a_g , facendo riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} , nel periodo di riferimento V_R per la vita utile della struttura.

Data la probabilità di superamento nel periodo di riferimento considerato, funzione dello Stato Limite di verifica, la forma spettrale è definita a partire dai valori dei seguenti parametri relativi ad un sito di riferimento rigido e orizzontale:

- a_g accelerazione orizzontale massima su sito rigido e superficie topografica orizzontale;
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_c^* periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Nella Relazione Sismica è stato dapprima stabilito il periodo di riferimento per l'azione sismica, sulla base della classificazione delle opere in progetto. Successivamente sono stati definiti gli stati limite di interesse per la verifica strutturale, i periodi di ritorno corrispondenti dell'azione sismica per suolo rigido in corrispondenza dei punti di interesse collocati lungo il tracciato.

La determinazione della categoria di suolo (e topografica) è stata eseguita attraverso l'interpretazione delle indagini geotecniche e geofisiche condotte per l'attuale fase di progetto: le informazioni disponibili configurano un quadro di relativa uniformità del tracciato rispetto al parametro $V_{s,30}$, caratterizzabile, ai fini normativi, con le categorie di suolo B e C. Per uniformità e a vantaggio di sicurezza, è possibile catalogare tutte le sedi delle opere nella categoria di suolo C, ossia “*Deposito di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).*”

L'amplificazione dell'azione sismica viene determinata, secondo le NTC2018, attraverso l'impiego di un fattore di sito S funzione sia della categoria di sottosuolo (S_s) sopra determinata, sia dell'andamento della superficie topografica (S_T):

$$S = S_s \cdot S_T$$

Per la **categoria di sottosuolo C**, il coefficiente S_s si ottiene dall'espressione seguente (vedi Tabella 3.2.IV del par. 3.2.3 delle NTC2018):

$$S_s = 1.00 \leq 1.70 - 0.60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.50$$

Per quanto riguarda l'eventuale amplificazione topografica, considerato che il sito di interesse si trova su superficie sostanzialmente pianeggiante (cat. T1, ossia Superficie pianeggiante e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$, in accordo alla Tabella 3.2.III del Doc. Rif. [6.]), il fattore di amplificazione topografica è pari a $S_T=1$.

Nella relazione sismica di progetto (Doc. Rif. [13.]) sono riportati i valori del fattore di sito accelerazione $a_g[g]$ attesi in condizioni di campo libero su suolo rigido, con superficie topografica orizzontale per i sette punti di riferimento individuati nella relazione sismica per lo stato limite di Salvaguardia della Vita (SLV). La verifica di stabilità globale in campo sismico dei rilevati tipologici è stata svolta considerando, a favore di sicurezza, il valore massimo di accelerazione $a_g[g]$ valutato lungo la linea. L'accelerazione massima attesa al suolo rigido assunta per tutte le analisi di stabilità dei rilevati è dunque pari a:

$$a_g=0.077g.$$

Essendo il fattore di sito $S[-]=1.5$, risulta:

$$a_{max} [g]= S a_g g=0.077g \times 1.5=0.116g.$$

Per maggiore dettaglio si rimanda alla relazione sismica di progetto (Doc. Rif. [13.]).

4.1. COMPONENTI DELL'ACCELERAZIONE EQUIVALENTE

Come definito in normativa, a meno di specifiche analisi dinamiche, è possibile svolgere le verifiche di sicurezza mediante analisi pseudo-statiche o analisi agli spostamenti.

4.2. COEFFICIENTI SISMICI PER LA VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE PER LE VERIFICHE DEI FRONTI DI SCAVO E RILEVATI

Secondo quanto definito nelle NTC2018 e nelle relative istruzioni per l'applicazione, la verifica di stabilità globale le verifiche in condizioni sismiche dei fronti di scavo e dei rilevati va condotta mediante il metodo di analisi definito al Par. 7.11.4 del Doc. Rif. [6.].

Sulla base di quanto definito al Par.7.11.3.5.2 del Doc. Rif. [6.], in mancanza di studi specifici, i coefficienti sismici k_h (orizzontale) e k_v (verticale) sono definiti come:

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

$$k_v = \pm k_h / 2$$

Le NT2018 indicano che il valore da adottare per β_s , coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito, debba essere 0.38 per le verifiche allo stato limite ultimo (SLV) (Par. 7.11.4 del Doc. Rif. [6.]).

In accordo a quanto sopra dichiarato, per i rilevati oggetto di questo elaborato si ottengono i coefficienti sismici dichiarati in Tabella 5.

Tabella 5: Valori dei coefficienti sismici per le verifiche dei fronti di scavo e rilevati

STATO LIMITE	T_R	k_h	k_v
	[anni]	[g]	[g]
SLV	1898	0.044	± 0.022

5. CARATTERISTICHE GENERALI DELLE OPERE

5.1. DESCRIZIONE DEI TRATTI IN RILEVATO

Con riferimento allo Stralcio “A” del Tronco II Lotto 6, per la sede stradale della dell’Autostrada Asti – Cuneo si prevede la presenza di rilevati di altezze variabili da 4-5 m a circa 10 m.

I rilevati in progetto prevedono pendenze pari a 3H:2V, banche di altezza massima pari a circa 5 m intervallate da berme di larghezza pari a circa 2 m.

Al fine di garantire il soddisfacimento delle verifiche SLU e SLE prescritte dalla normativa vigente (Doc. Rif. [6.]), sono stati previsti interventi di stabilizzazione e/o riduzione dei cedimenti.

Per quanto riguarda la geometria dei rilevati, si è fatto riferimento agli elaborati di progetto (Doc. Rif. da [14.] a [20.]).

In Tabella 6 sono elencate le sezioni di calcolo oggetto di questo elaborato con indicazione delle tratte di riferimento e del tipo di intervento.

Per maggiore dettaglio si rimanda ai paragrafi seguenti.

Tabella 6: Sezioni di calcolo

ID	Sezione di calcolo	Tratta di riferimento	Tipo di intervento	Caratteristiche dell'intervento
Rilevato RLV01	km 0+018	0+015 – 0+290	Bonifica	Spessore 1.5 m
Rilevato RLV02	km 0+700	0+693 – 0+861	Bonifica	Spessore 2.0 m
Rilevato RLV03	km 1+500	1+155 – 1+634	Bonifica	Spessore 2.0 m
Rilevato RLV04	km 1+720	1+635 – 1+800	Inclusioni rigide	Pali CFA D600mm a maglia 3.5m quinconce, L10m, con interposizione di strato granulare di ripartizione di spessore 80 cm con geogriglia di rinforzo
Rilevato RLV05	km 2+095	1+977 – 2+095	Bonifica	Spessore 2.0 m
	km 2+135	2+095 – 2+156	Inclusioni rigide	Pali CFA D600mm a maglia 3.5m quinconce, L18m, con interposizione di strato granulare di ripartizione di spessore 80 cm con geogriglia di rinforzo

ID	Sezione di calcolo	Tratta di riferimento	Tipo di intervento	Caratteristiche dell'intervento
Rilevato RLV06 RLV07	km 2+340 km 2+360	2+300 – 2+375	Terra rinforzata	Geogriglie di lunghezza variabile tra 6 m e 12 m a interasse 0.6m, risvoltate 1.0 m, resistenza a lungo termine $T > 70$ kN/m
	km 2+450	2+375 – 2+468	Terra rinforzata + Inclusioni rigide	Geogriglie come sopra più Pali CFA D600mm a maglia 3.5m quinconce, L8m, con interposizione di strato granulare di ripartizione di spessore 80 cm con geogriglia di rinforzo
Rilevato RLV08	km 2+875	2+861 – 3+100	Inclusioni rigide	Pali CFA D600mm a maglia 3.5m quinconce, L8m, con interposizione di strato granulare di ripartizione di spessore 80 cm con geogriglia di rinforzo
	km 3+100	3+100 – 3+210	Bonifica	Spessore 1.0 m

5.2. MATERIALI ANTROPICI

Una sintesi dei parametri geotecnici di calcolo per i materiali antropici è riportata in Tabella 7.

Tabella 7: Parametri geotecnici di calcolo – materiali antropici

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio			Coesione efficace	Coesione non drenata	Modulo di Young operativo
	g_d	f'_k	$f'_d M1$	$f'_d M2$	c'_k	$c_{u'k}$	$E_{op.}$
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]
RILEVATO	19	38	38	32	0	-	30
STRATO BONIFICO	19	36	36	30.2	0	-	25

5.3. CARICHI DI PROGETTO

È stato considerato un sovraccarico con valore caratteristico pari a 20 kPa quale carico variabile rappresentativo del traffico autostradale. Il sovraccarico da traffico viene considerato solamente nelle analisi SLU (stabilità), ma non in quelle SLE (valutazione dei cedimenti).

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

6. METODOLOGIE DI VERIFICA E CODICI DI CALCOLO

6.1. METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE

6.1.1. Verifiche di stabilità

Le verifiche SLU di stabilità globale sono state implementate sia in campo statico che in campo sismico (adottando il metodo pseudo-statico) tramite il codice di calcolo Slope/W (Doc. Rif. [21.]).

Nelle verifiche di stabilità globale del rilevato (sia in condizioni statiche che sismiche) si fa riferimento:

- per le analisi in campo statico, ai valori di progetto per azioni e ai valori di progetto dei parametri geotecnici valutati in accordo ai coefficienti parziali (A2+M2); Tali coefficienti sono contenuti nella Tabella 1 e nella Tabella 2 della presente relazione.
- per le analisi sismiche con approccio pseudo-statico, ai valori caratteristici sia per le azioni che per i parametri geotecnici.

Come da NTC 2018 (Doc. Rif. [6.]), la verifica SLU di stabilità globale è soddisfatta se la relazione $FS \geq \gamma_R$, in particolare:

- per le analisi in campo statico, $\gamma_R = 1.1$ (Tab. 6.8.I, Doc. Rif.[6.] e Tabella 3 di questa relazione);
- per le analisi sismiche con approccio pseudo-statico, $\gamma_R = 1.2$ (par. 7.11.4, Doc. Rif.[6.] e paragrafo 3.2.1.1 di questa relazione).

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

$K_H=0.044$ (concorde alla direzione di scivolamento)

$K_V=\pm 0.022$

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.

6.1.2. Valutazione comportamento tensio-deformativo

Le verifiche SLE sono state implementate in campo statico tramite analisi ad Elementi Finiti con il codice di calcolo PLAXIS (Doc. Rif. [22.]).

In tali analisi di consolidazione è stato possibile stimare l'andamento del cedimento nel tempo al fine di calcolare un cedimento differenziale tra la "messa in esercizio" del rilevato e una condizione a "lungo termine" assunta pari a 50 anni dopo la costruzione della sede autostradale in rilevato.

6.2. CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI

6.2.1. Slope/W

Slope/W (Doc. Rif. [21.]) è un codice di calcolo 2D 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.

6.2.2. Plaxis 2D

Plaxis 2D (Doc. Rif. [22.]) 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 del modello 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).

Tabella 8: Parametri geotecnici di calcolo dei materiali in sito

Unità	Prof. da [m da p.c.]	Prof. a [m da p.c.]	γ kN/m ³	φ' °	c' kPa	c_u kPa	Cc [-]	Cr [-]	e_0 [-]	OCR [-]
CCS	0	30	19	21	0	80 - 120	0.15	0.04	0.65	3
GES2	30	70	19	21	10	150	0.18	0.034	0.6	2
GES1	70	95	21	21	20	200	0.18	0.034	0.6	2

7.2. VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE

Per la verifica di stabilità globale del rilevato, è stato implementato un modello 2D tramite il codice di calcolo SLOPE/W descritto al paragrafo 6.2.1.

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.

Per completezza si riporta in Figura 2 l'analisi di stabilità del rilevato in assenza di interventi. Come si può notare i requisiti minimi di normativa in termini di stabilità del rilevato non sono garantiti. Nei successivi paragrafi si riportano le analisi di stabilità in presenza di interventi.

7.2.1. Verifiche SLU in condizioni statiche

In accordo a quanto dichiarato al paragrafo 3.1.1, le analisi sono state implementate in accordo all'Approccio 1 - Combinazione 2 e la verifica risulta soddisfatta per un fattore di sicurezza pari a $FS_{min}=1.1$.

Come si può notare dall'analisi in Figura 2, i requisiti di normativa in termini di stabilità del rilevato non sono garantiti senza nessun intervento.

In Tabella 9 si riportano il fattore di sicurezza calcolato e la figura di riferimento con indicazione del meccanismo critico associato ad esso; essendo $FS > 1.1$, **la verifica di stabilità globale in campo statico è soddisfatta.**

Tabella 9: Analisi di stabilità globale in campo statico

Sezione di calcolo	FS	Meccanismo di riferimento
RIL01 (km 0+020)	1.141	Figura 3

7.2.2. Verifiche SLU in condizioni sismiche

In accordo a quanto dichiarato al paragrafo 3.2, le analisi sono state implementate considerando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici e la verifica risulta soddisfatta per un fattore di sicurezza pari a $FS_{min}=1.2$.

In Tabella 10 si riporta il fattore di sicurezza calcolato e la figura di riferimento con indicazione del meccanismo critico associato ad esso; essendo $FS>1.2$, **la verifica di stabilità globale in campo pseudo statico è soddisfatta.**

Tabella 10: Analisi di stabilità globale in campo statico

Sezione di calcolo	FS	Meccanismo di riferimento
RIL01 (km 0+018)	1.439 (kv>0)	Figura 4 (kv>0)
	1.430 (kv<0)	Figura 5 (kv<0)

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 0+018
Condizioni statiche

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 32 °	Piezometric Line: 1
Name: CCS	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: GES2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 8 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: GES1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 21 kN/m ³	Cohesion: 16 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1

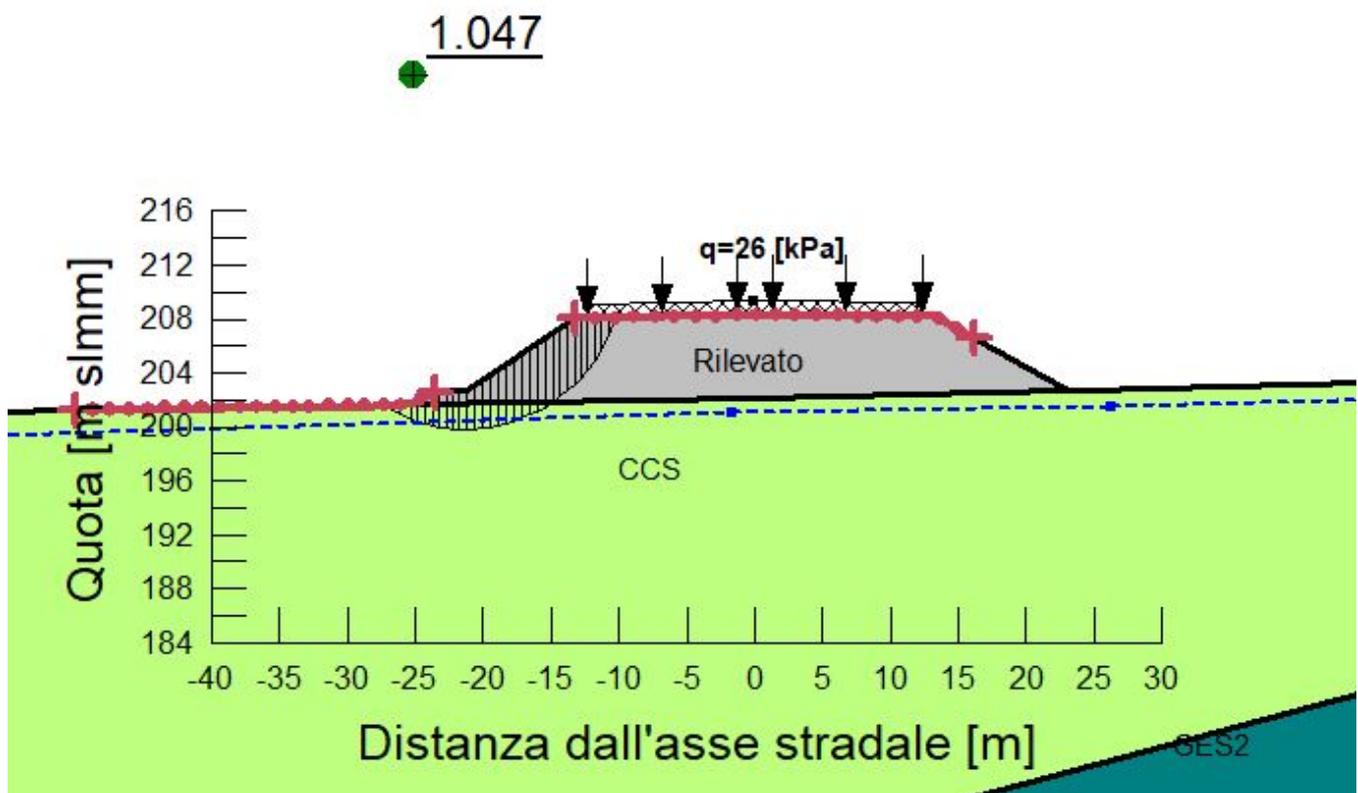


Figura 2: Modello SLOPE (senza interventi) – Analisi di stabilità in condizioni statiche

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 0+018
Condizioni statiche

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 32 °	Piezometric Line: 1
Name: CCS	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: Bonifico	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 30.2 °	Piezometric Line: 1
Name: GES2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 8 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: GES1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 21 kN/m ³	Cohesion: 16 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1

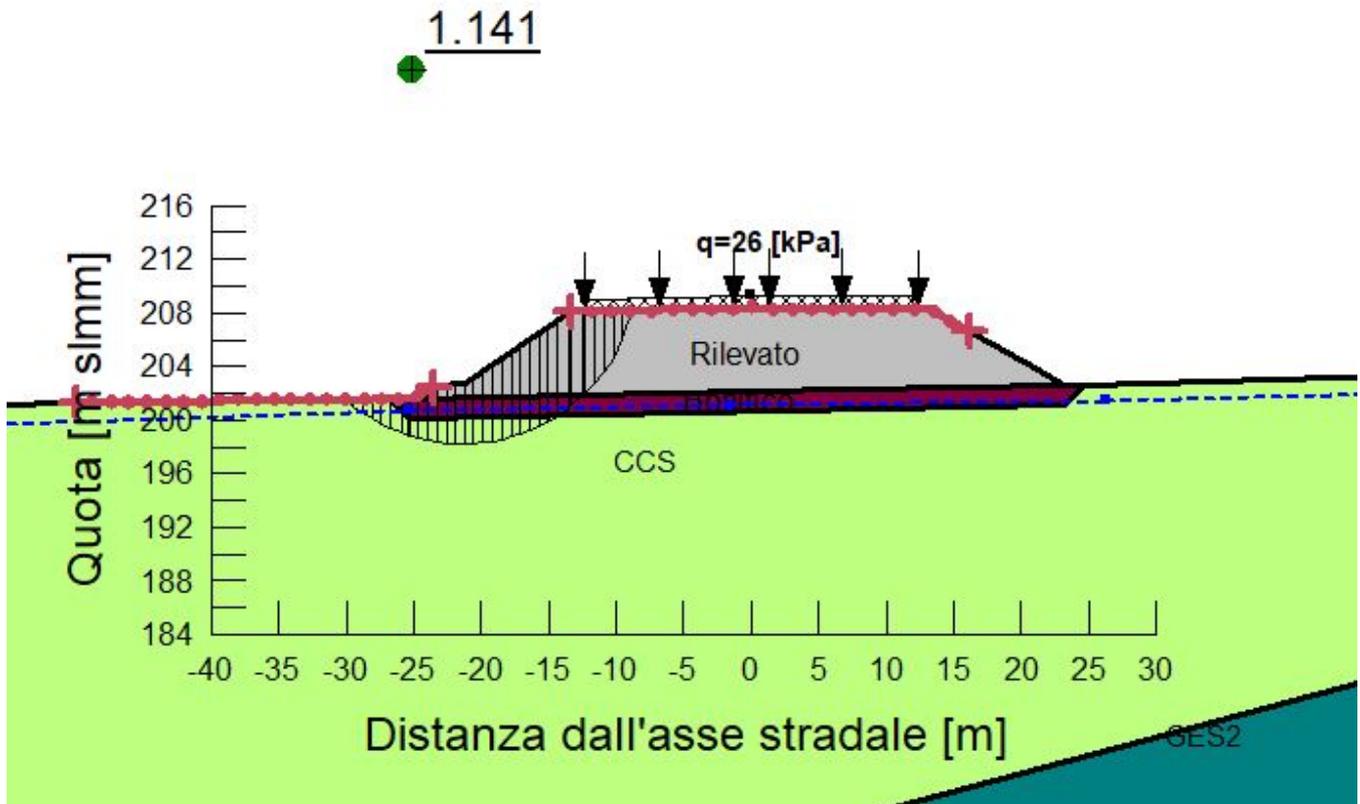
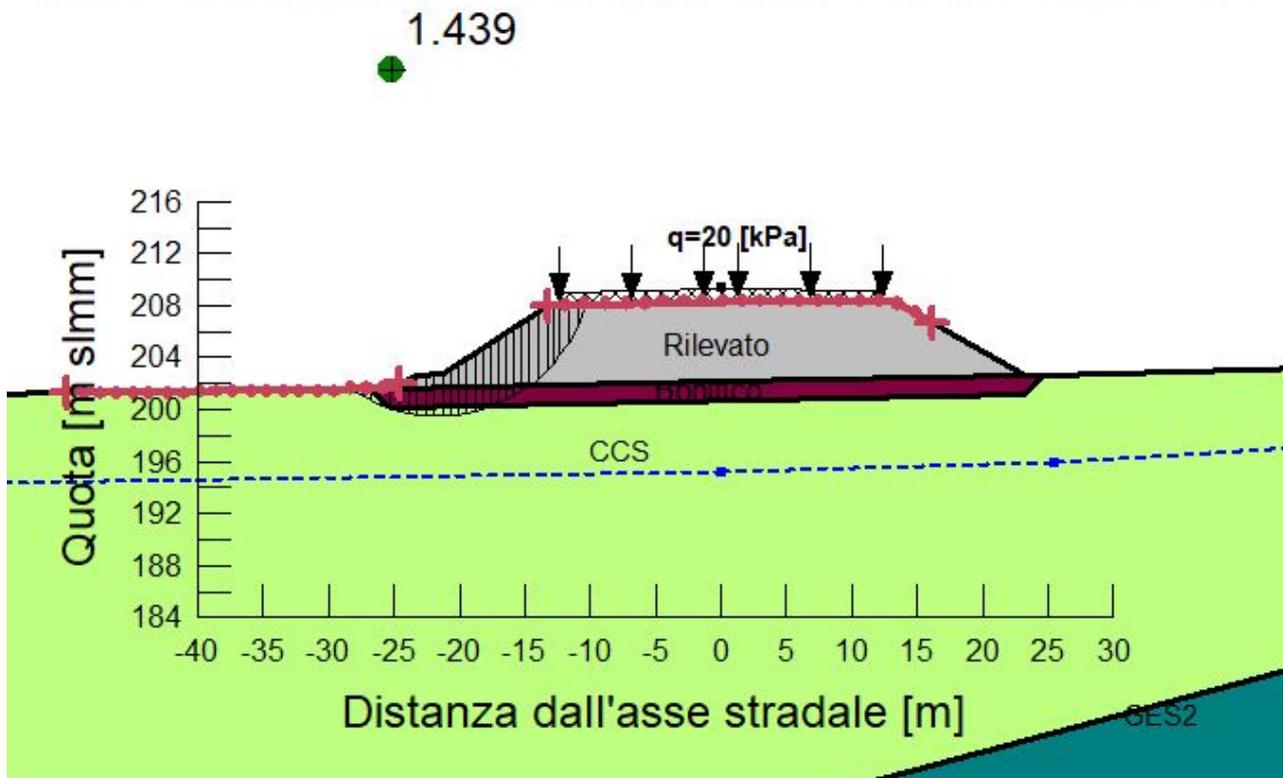


Figura 3: Modello SLOPE (con interventi) – Analisi di stabilità in condizioni statiche

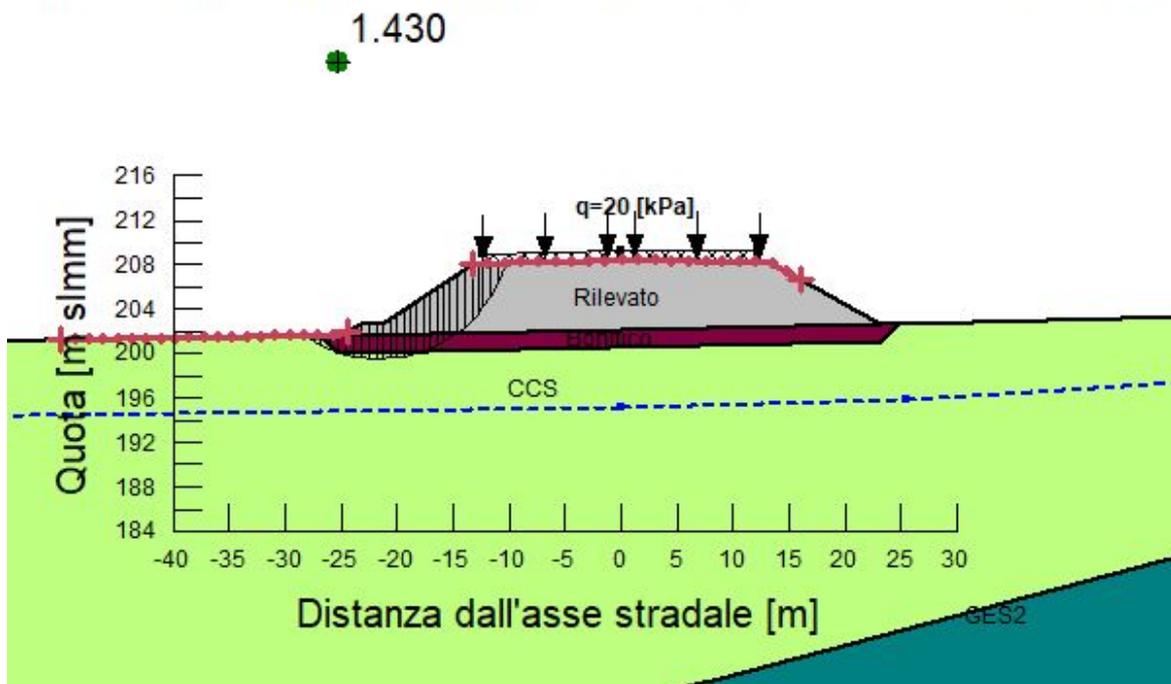
**AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
 TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)**
**Analisi di stabilità rilevati
 Sez. 0+018**
Condizioni sismiche $k_h=0.044$ $k_v=0.022$

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 38 °	Piezometric Line: 1
Name: CCS	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: Bonifico	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 36 °	Piezometric Line: 1
Name: GES2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 10 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: GES1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 21 kN/m ³	Cohesion: 20 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1


 Figura 4: Modello SLOPE (con interventi) – Analisi di stabilità in condizioni sismiche ($k_v > 0$)

**AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
 TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)**
**Analisi di stabilità rilevati
 Sez. 0+018**
Condizioni sismiche $k_h=0.044$ $k_v=-0.022$

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 38 °	Piezometric Line: 1
Name: CCS	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: Bonifico	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 36 °	Piezometric Line: 1
Name: GES2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 10 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: GES1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 21 kN/m ³	Cohesion: 20 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1


 Figura 5: Modello SLOPE (con interventi) – Analisi di stabilità sismica ($k_v < 0$)

7.3. VERIFICHE SLE

7.3.1. Introduzione e descrizione interventi

Per la stima dei cedimenti al disotto del rilevato, è stato implementato un modello 2D ad elementi finiti tramite il codice di calcolo PLAXIS descritto al paragrafo 6.2.2.

Le analisi sono finalizzate alla stima dei cedimenti attesi nel tempo e alla stima del cedimento residuo definito come la differenza tra il cedimento calcolato nella fase di “messa in esercizio” e i cedimenti attesi a lungo termine, considerando una durata significativa di 50 anni dopo la costruzione del rilevato.

La progettazione e il dimensionamento degli interventi hanno avuto come criterio quello di limitare il cedimento entro limiti accettabili, sia in termini di cedimento totale a lungo termine, che in termini di cedimento residuo dopo il termine dei lavori.

Per il caso particolare si prevede solamente una bonifica del terreno in sito al di sotto del rilevato, con scavo e sostituzione con materiale granulare selezionato ben compattato per uno spessore di 1.5 m. Tale intervento è sufficiente in quanto nella zona non sono presenti dissesti o materiali particolarmente cedevoli.

7.3.2. Mesh, stratigrafia e falda

La mesh e la stratigrafia sono mostrate di seguito in Figura 6. La stratigrafia è stata presa in sezione facendo riferimento a quanto riportato sul profilo geotecnico e sulle sezioni geotecniche. La falda è stata considerata a livelli “standard”, ovvero a quanto riportato sul profilo geotecnico; la falda si trova ad una profondità variabile tra 5.5 m e 8.5 m rispetto al piano campagna.

7.3.3. Modelli costitutivi e parametri geotecnici caratteristici

Per tutti gli strati di terreno naturale si è fatto riferimento ad un modello costitutivo “Soft-Soil”, dove la cedevolezza è governata dai coefficienti di compressibilità in primo carico, in scarico e ricarico e dal grado di sovraconsolidazione, con un modulo corrente quindi variabile in relazione allo stato tensionale corrente. I parametri geotecnici caratteristici utilizzati sono quelli dichiarati in Tabella 8. La permeabilità è stata presa pari a 10^{-8} m/s.

Per i materiali costituenti la bonifica e il rilevato si è invece fatto riferimento ad un modello costitutivo “Mohr-Coulomb”. I parametri geotecnici caratteristici utilizzati sono quelli dichiarati in Tabella 7. La permeabilità è stata presa pari a 10^{-4} m/s.

7.3.4. Carichi

Nelle analisi effettuate per la valutazione dei cedimenti non sono stati considerati sovraccarichi di tipo variabile.

7.3.5. Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono quelle “standard” automaticamente impostate nel codice di calcolo, ovvero spostamenti orizzontali bloccati ai bordi verticali del modello e spostamenti verticali bloccati alla base del modello.

Le condizioni idrauliche al contorno sono quelle “standard” automaticamente impostate nel codice di calcolo, ovvero moto di filtrazione consentito ai bordi verticali ma impedita alla base del modello.

7.3.6. Fasi di calcolo

Le fasi di costruzione simulate nel calcolo sono le seguenti:

1. Generazione dello stato tensionale iniziale con piano campagna attuale;
2. Scavo e sostituzione fino a 1.5 m di profondità per bonifica;
3. Costruzione del rilevato sino all'altezza di progetto (durata 180 giorni)
4. Attesa 1 anno per la stima dei cedimenti a fine costruzione rilevato, prima della messa in esercizio dell'autostrada;
5. Attesa 50 anni per la stima dei cedimenti a lungo termine.

Le prime due fasi sono state effettuate senza considerare la consolidazione (a "lungo termine"), mentre per le successive la consolidazione è stata considerata assegnando dei tempi compatibili con quelli di costruzione di un rilevato autostradale. I cedimenti sono valutati nel seguito a partire dall'inizio della suddetta fase 3.

7.3.7. Risultati

I risultati delle analisi FEM per la stima dei cedimenti sono riportati nelle figure seguenti, in particolare:

- In Figura 7 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 4 di cui sopra;
- In Figura 8 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 5 di cui sopra;
- In Figura 9 si riporta l'andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3 di cui sopra) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso;
- In Figura 10 si riporta l'andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5 di cui sopra.

In Tabella 11 si riportano i cedimenti stimati per un punto in asse al rilevato, alla base dello stesso (derivati da Figura 10) alla fine della costruzione dell'opera (prima della messa in esercizio, fine della fase 4 di cui sopra) e a "lungo termine" (fine della fase 5 di cui sopra). Nella stessa tabella si riporta il valore del cedimento residuo a "lungo termine" pari alla differenza fra i due precedenti.

Con riferimento ai risultati ottenuti sia in termini di valore assoluto (da inizio costruzione rilevato) che residuo dopo la messa in esercizio dell'opera, si ritiene che i valori di cedimento stimati siano compatibili con la funzionalità dell'opera. I cedimenti che si verificano all'interno del corpo del rilevato sono dell'ordine di massimo 1 cm (vedi Figura 9) e possono essere "recuperati" durante la costruzione del rilevato stesso.

Tabella 11: Sintesi sulla valutazione dei cedimenti

Sezione di calcolo	Cedimento a base rilevato, in asse rilevato prima della messa in esercizio (cm)	Cedimento a base rilevato, in asse rilevato a lungo termine (cm)	Cedimento residuo (cm)
RIL01 (km 0+018)	18.7	19.9	1.2

Output Version 2019.0.0.0

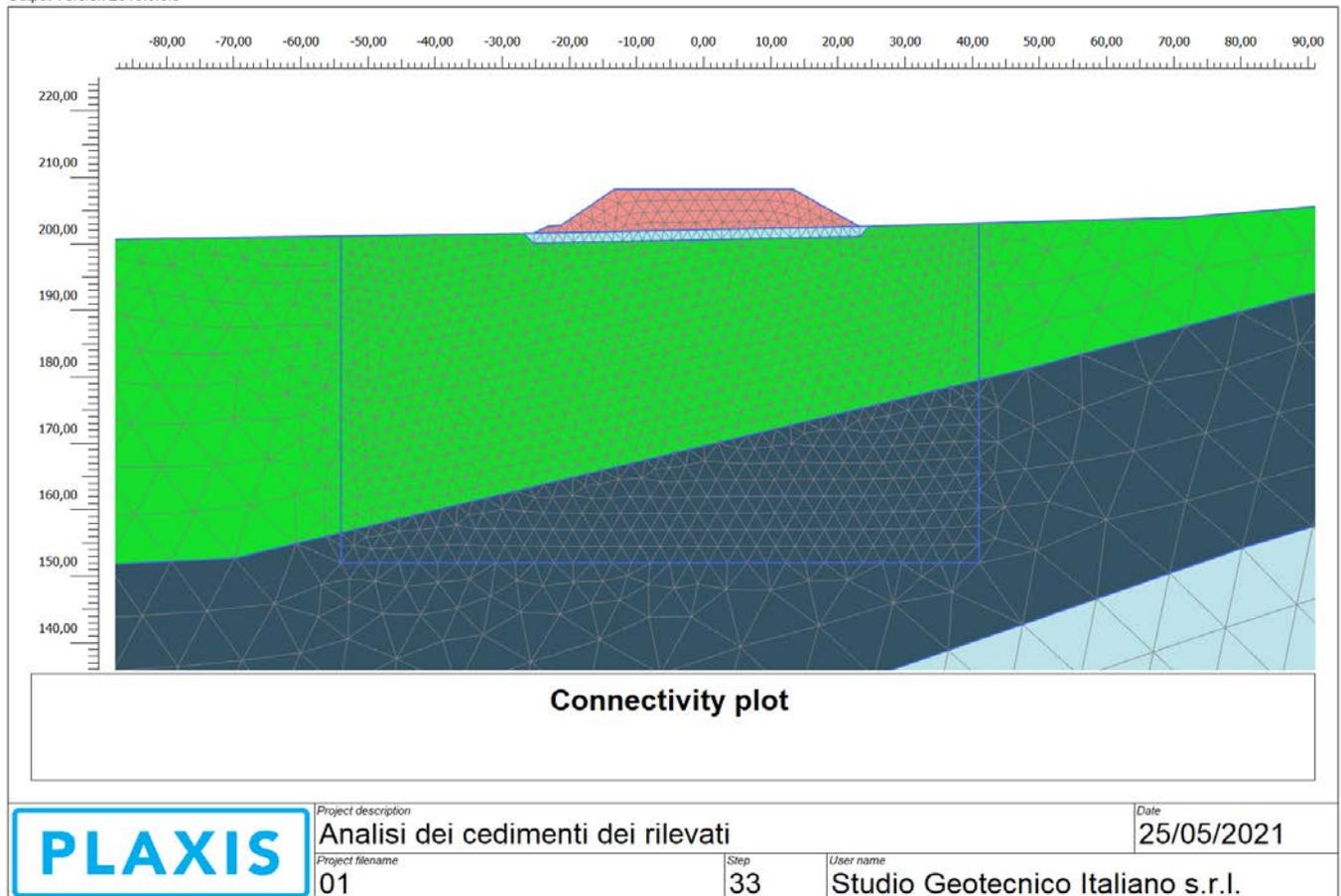


Figura 6 – Modello PLAXIS (con interventi)

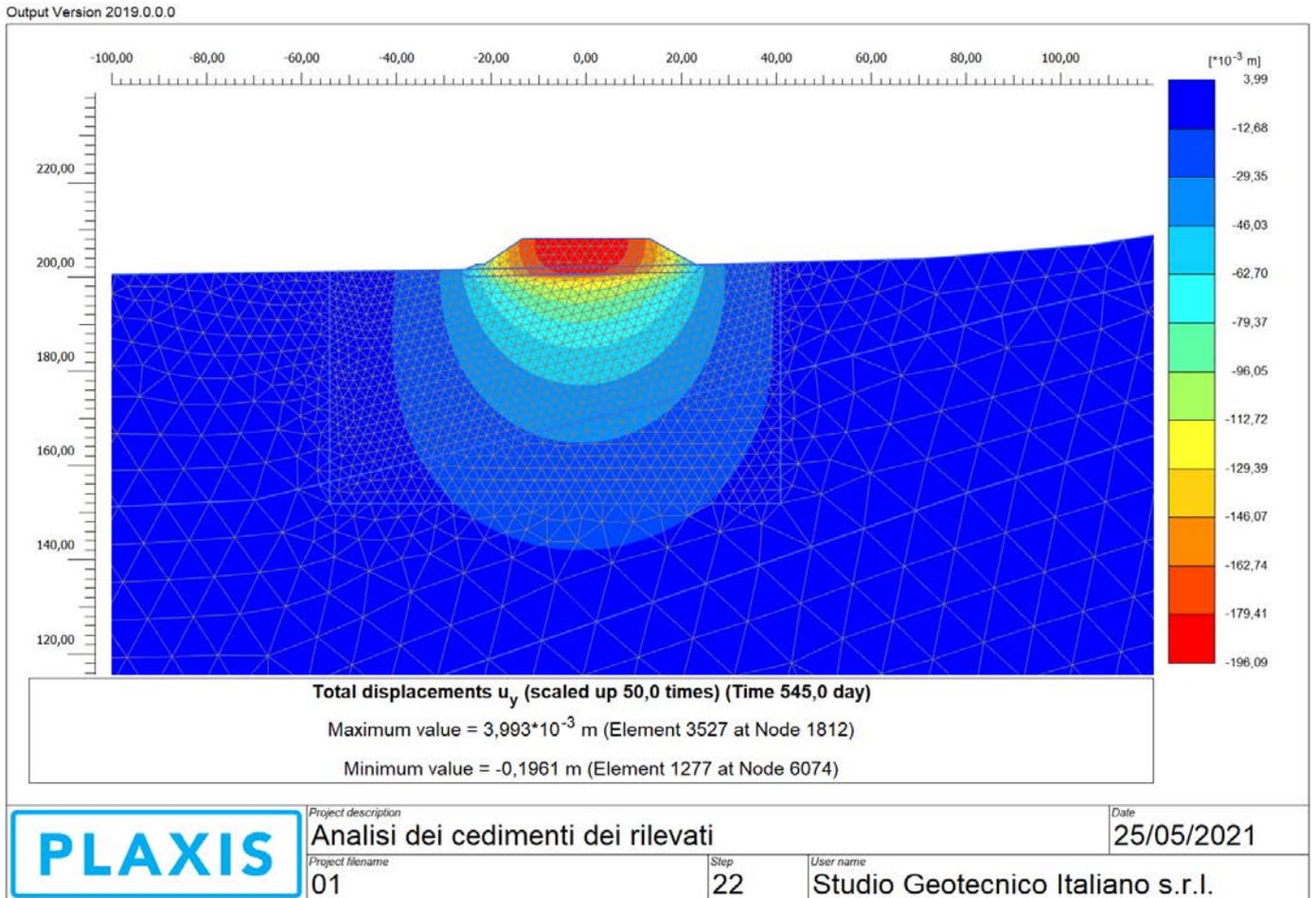


Figura 7: Modello PLAXIS con interventi – cedimenti del modello a fine fase 4

Output Version 2019.0.0.0

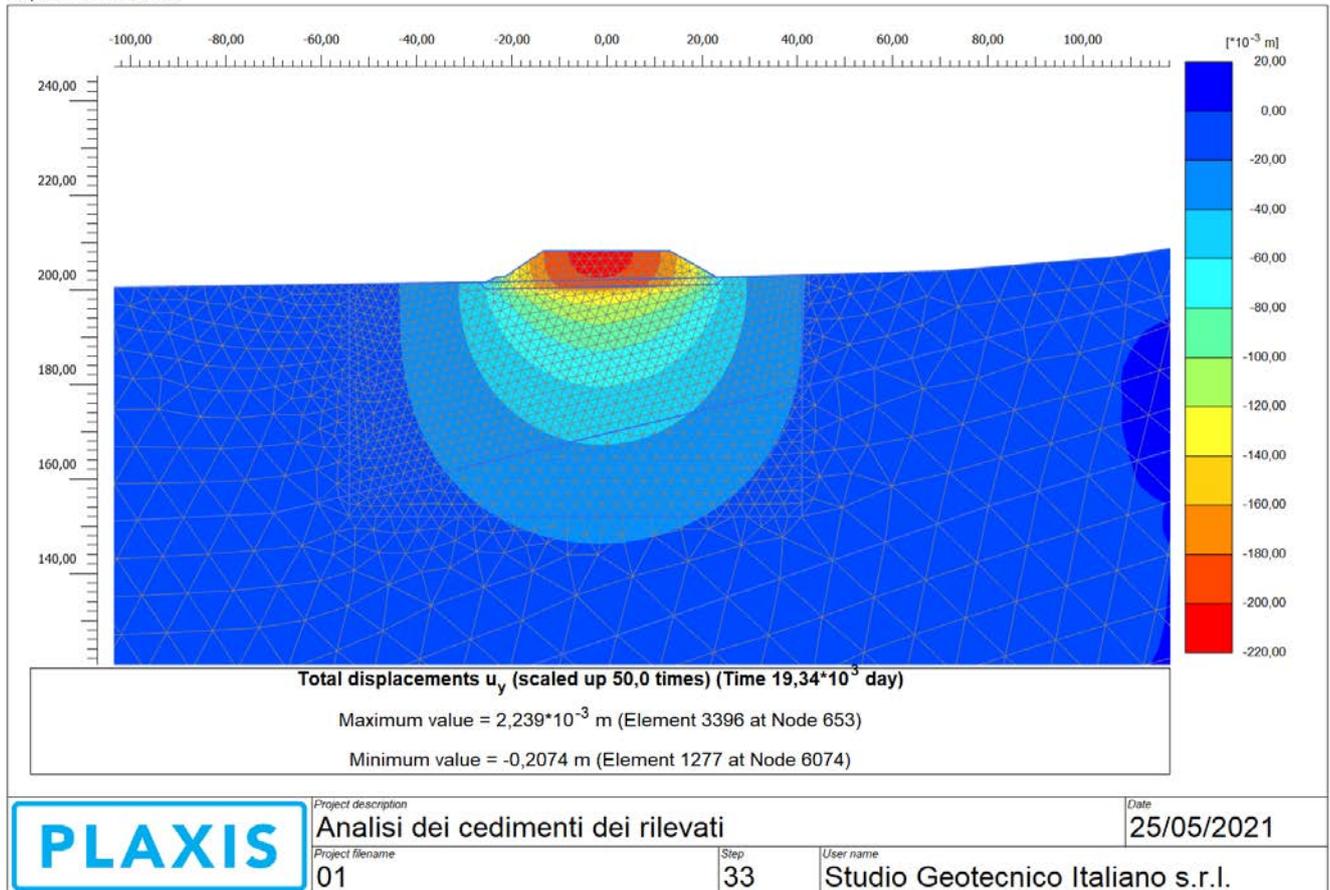


Figura 8 Modello PLAXIS con interventi – cedimenti del modello a fine fase 5

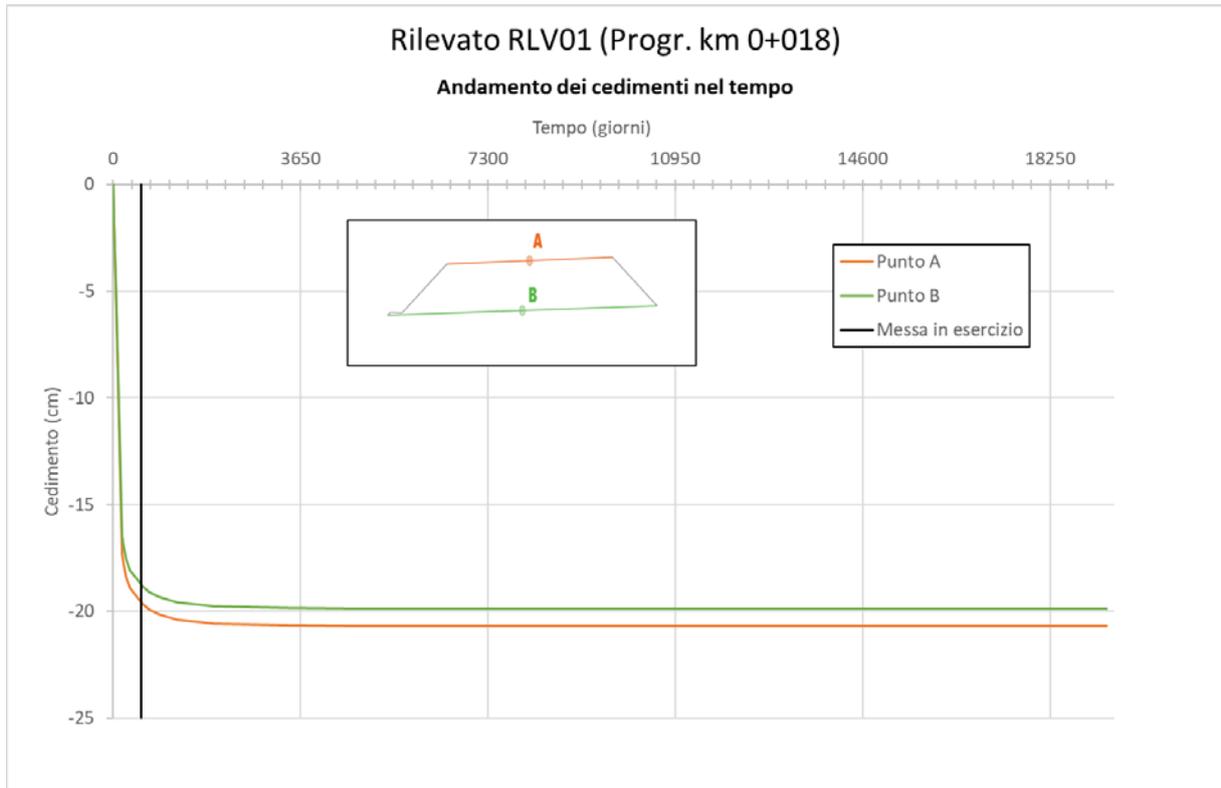


Figura 9 Modello PLAXIS con interventi – andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso

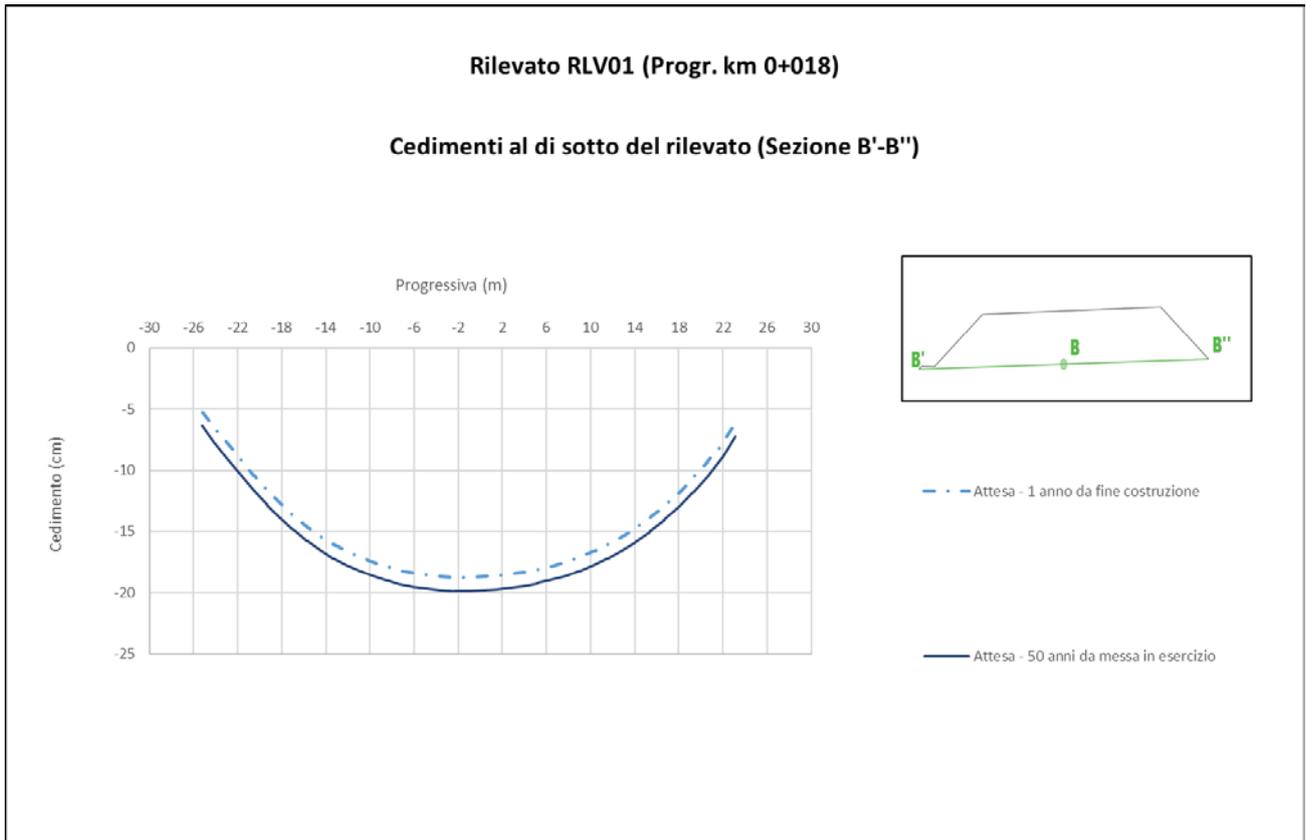


Figura 10 Modello PLAXIS con interventi – andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5

8. RLV02

Oggetto di questo capitolo è il rilevato identificato con come “RLV02” relativo alla tratta autostradale compresa tra il km 0+693 e il km 0+861 (vedi Tabella 6). Come sezione di calcolo è stata scelta la sezione che corrisponde al km 0+700, dove il rilevato è più alto (vedi Figura 11).

L'intervento previsto ai fini di garantire il soddisfacimento delle verifiche prescritte dalle NTC2018 in termini di stabilità globale e cedimenti è un intervento di bonifico con spessore pari a 2.0 m.

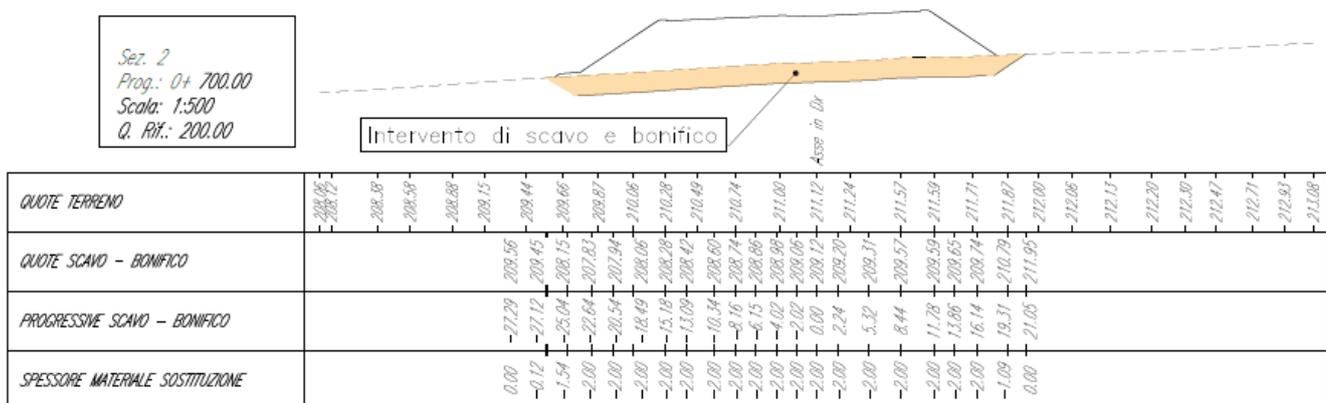


Figura 11: Sezione al km 0+700

8.1. STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

In Tabella 12 sono riportati i valori dei parametri geotecnici caratteristici del terreno naturale. Nella stessa tabella sono riportati anche gli spessori indicativi degli strati; in ogni caso per la stratigrafia lungo la sezione si è fatto riferimento al profilo geotecnico e alle sezioni geotecniche.

Con riferimento ai materiali antropici (rilevato e bonifico) si rimanda alla Tabella 7.

La falda di progetto è stata assunta per le verifiche SLU in condizioni statiche come prossima al piano campagna (a circa 1 m di profondità). Tale assunzione è stata fatta sulla base del monitoraggio piezometrico in base al quale si hanno escursioni di falda anche di 8-10m, a dimostrazione del fatto che la bassa permeabilità dei materiali fa saturare rapidamente il terreno in corrispondenza degli eventi piovosi.

Per le verifiche SLU in condizioni sismiche la falda di progetto è stata assunta variabile tra 3.5 m e 6.5 m di profondità, come rappresentata sul profilo geotecnico.

Per le verifiche SLE (valutazione dei cedimenti), la falda di progetto è stata assunta variabile tra 3.5 m e 6.5 m di profondità, come rappresentata sul profilo geotecnico.

Per maggiore dettaglio si rimanda alla relazione geotecnica di progetto (Doc. Rif. [9.]).

Tabella 12: Parametri geotecnici di calcolo dei materiali in sito

Unità	Prof. da [m da p.c.]	Prof. a [m da p.c.]	γ kN/m ³	φ' °	c' kPa	c_u kPa	Cc [-]	Cr [-]	e_0 [-]	OCR [-]
CCS	0	9	19	21	0	80 - 120	0.05	0.04	0.65	3
GES2	9	12	19	21	10	150	0.18	0.034	0.6	2
GES1	12	37	21	21	20	200	0.18	0.034	0.6	2
SAF	60	60	19	21	25	250	0.17	0.05	0.7	2

8.2. VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE

Per la verifica di stabilità globale del rilevato, è stato implementato un modello 2D tramite il codice di calcolo SLOPE/W descritto al paragrafo 6.2.1.

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.

Per completezza si riporta in Figura 12 l'analisi di stabilità del rilevato in assenza di interventi. Come si può notare i requisiti minimi di normativa in termini di stabilità del rilevato non sono garantiti. Nei successivi paragrafi si riportano le analisi di stabilità in presenza di interventi.

8.2.1. Verifiche SLU in condizioni statiche

In accordo a quanto dichiarato al paragrafo 3.1.1, le analisi sono state implementate in accordo all'Approccio 1 - Combinazione 2 e la verifica risulta soddisfatta per un fattore di sicurezza pari a $FS_{min}=1.1$.

In Tabella 13 si riporta il fattore di sicurezza calcolato e la figura di riferimento con indicazione del meccanismo critico associato ad esso; essendo $FS > 1.1$, **la verifica di stabilità globale in campo statico è soddisfatta.**

Tabella 13: Analisi di stabilità globale in campo statico

Sezione di calcolo	FS	Meccanismo di riferimento
RIL02 (km 0+700)	1.129	Figura 13

8.2.2. Verifiche SLU in condizioni sismiche

In accordo a quanto dichiarato al paragrafo 3.2, le analisi sono state implementate considerando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici e la verifica risulta soddisfatta per un fattore di sicurezza pari a $FS_{min}=1.2$.

In Tabella 14 si riporta il fattore di sicurezza calcolato e la figura di riferimento con indicazione del meccanismo critico associato ad esso; essendo $FS>1.2$, **la verifica di stabilità globale in campo pseudo statico è soddisfatta.**

Tabella 14: Analisi di stabilità globale in campo statico

Sezione di calcolo	FS	Meccanismo di riferimento
RIL02 (km 0+700)	1.476 (kv>0)	Figura 14 (kv>0)
	1.468 (kv<0)	Figura 15 (kv<0)

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 0+700
Condizioni statiche

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 32 °	Piezometric Line: 1
Name: CCS	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: GES2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 8 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: GES1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 21 kN/m ³	Cohesion: 16 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: SAF	Model: Undrained (Phi=0)	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 178.6 kPa		Piezometric Line: 1

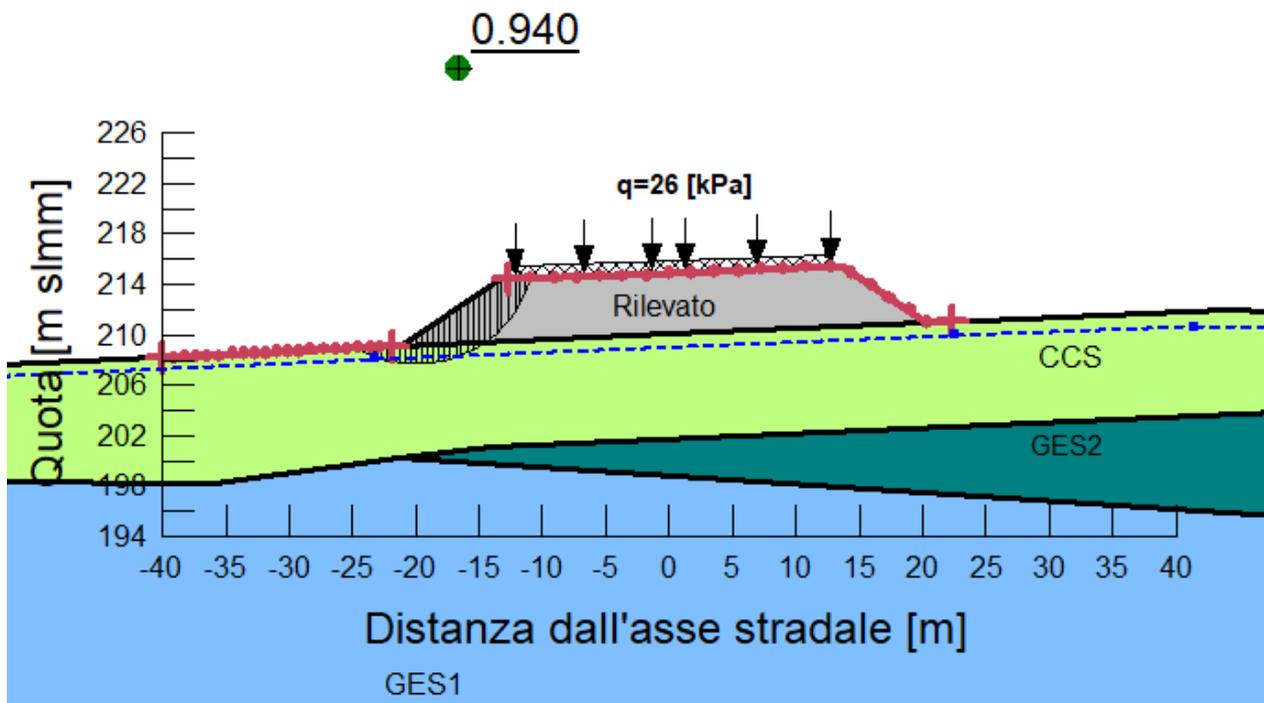


Figura 12: Modello SLOPE (senza interventi) – Analisi di stabilità in condizioni statiche

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 0+700
Condizioni statiche

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 32 ° Piezometric Line: 1
 Name: CCS Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: Bonifico Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 30.2 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 8 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES1 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 21 kN/m³ Cohesion: 16 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: SAF Model: Undrained (Phi=0) Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 178.6 kPa Piezometric Line: 1

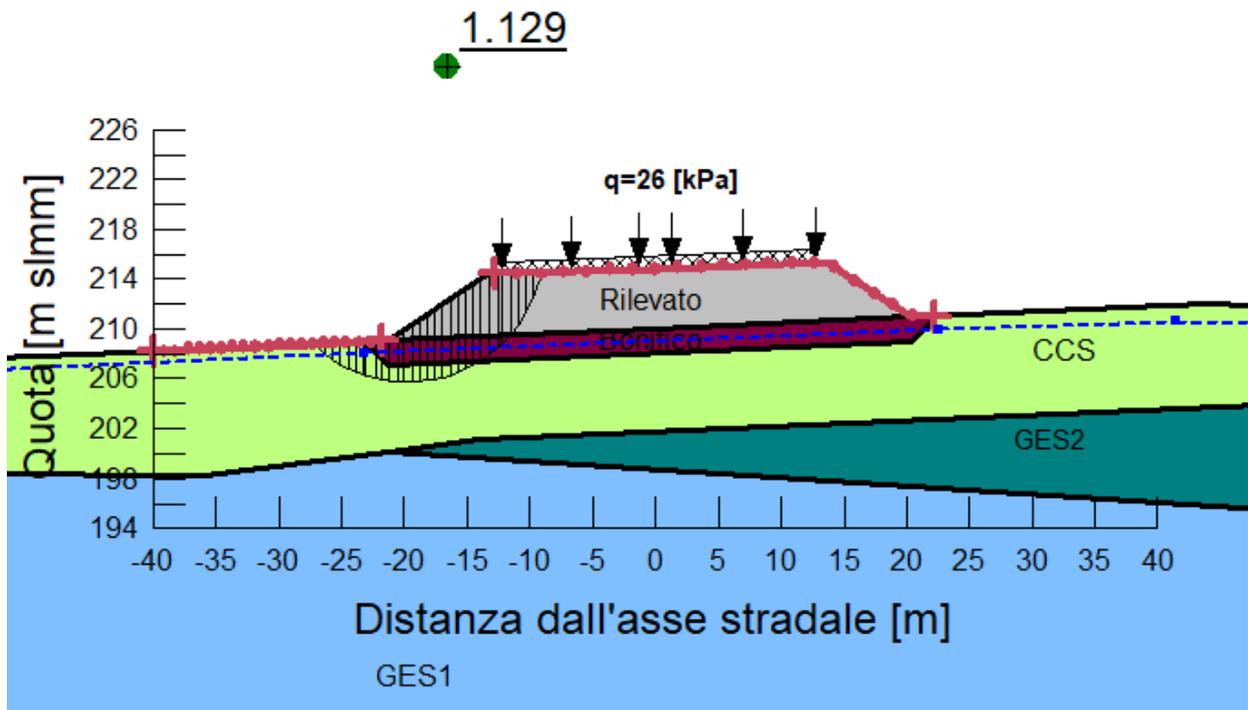
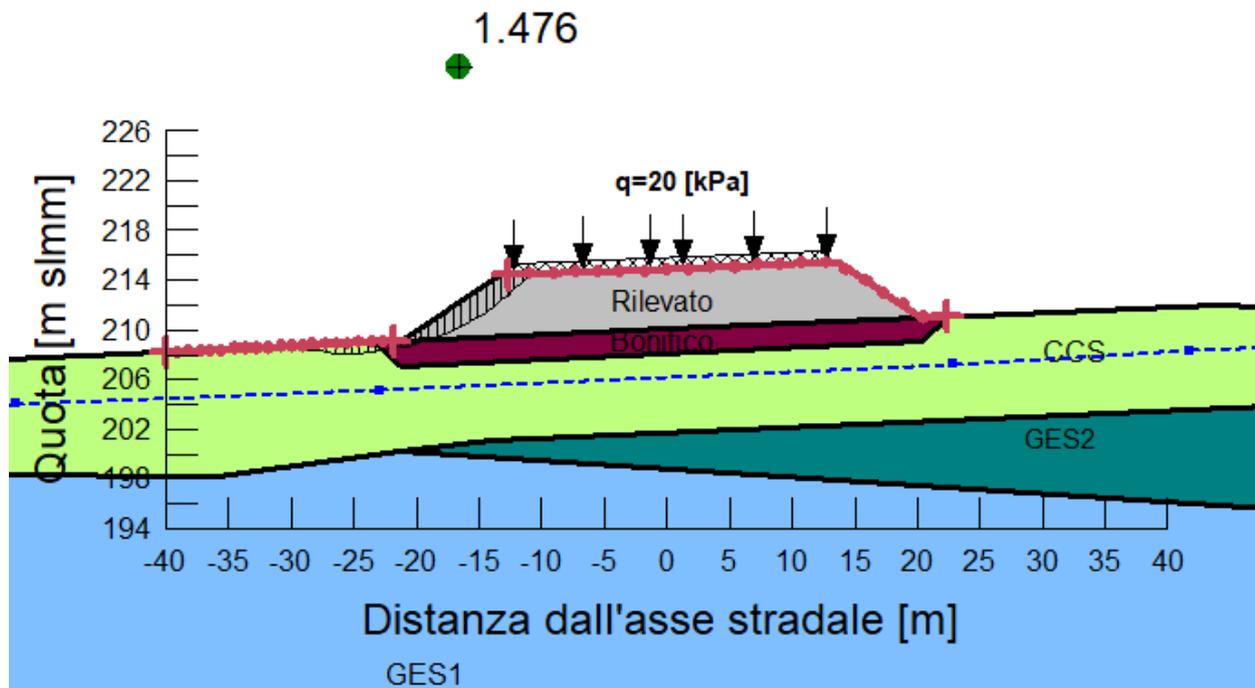


Figura 13: Modello SLOPE (con interventi) – Analisi di stabilità in condizioni statiche

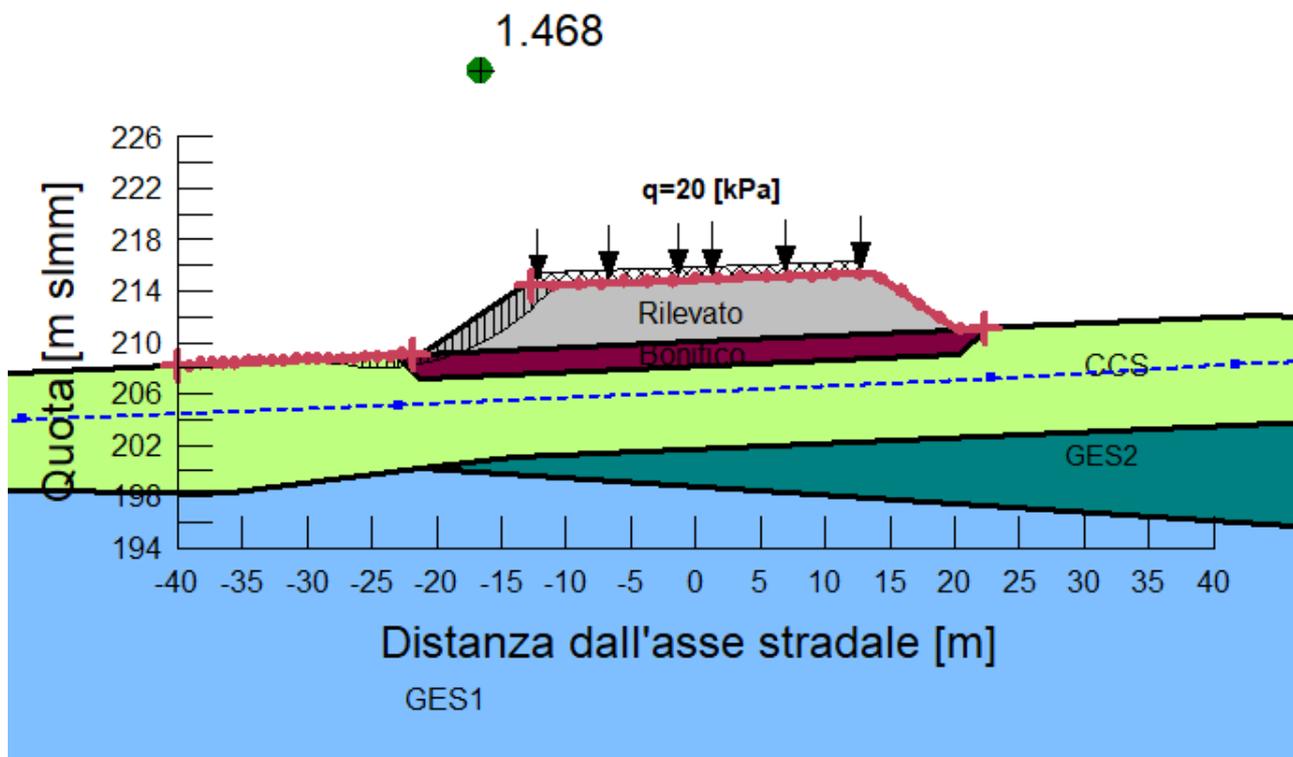
AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 0+700
Condizioni sismiche $kh=0.044$ $kv=0.022$

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 38 °	Piezometric Line: 1
Name: CCS	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: Bonifico	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 36 °	Piezometric Line: 1
Name: GES2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 10 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: GES1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 21 kN/m ³	Cohesion: 20 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: SAF	Model: Undrained (Phi=0)	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 250 kPa		Piezometric Line: 1


 Figura 14: Modello SLOPE (con interventi) – Analisi di stabilità in condizioni sismiche ($kv>0$)

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 0+700
Condizioni sismiche $k_h=0.044$ $k_v=-0.022$

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 38 ° Piezometric Line: 1
 Name: CCS Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: Bonifico Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 36 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 10 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES1 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 21 kN/m³ Cohesion: 20 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: SAF Model: Undrained (Phi=0) Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 250 kPa Piezometric Line: 1


 Figura 15: Modello SLOPE (con interventi) – Analisi di stabilità sismica ($k_v < 0$)

8.3. VERIFICHE SLE

8.3.1. Introduzione e descrizione interventi

Per la stima dei cedimenti al disotto del rilevato, è stato implementato un modello 2D ad elementi finiti tramite il codice di calcolo PLAXIS descritto al paragrafo 6.2.2.

Le analisi sono finalizzate alla stima dei cedimenti attesi nel tempo e alla stima del cedimento residuo definito come la differenza tra il cedimento calcolato nella fase di “messa in esercizio” e i cedimenti attesi a lungo termine, considerando una durata significativa di 50 anni dopo la costruzione del rilevato.

La progettazione e il dimensionamento degli interventi hanno avuto come criterio quello di limitare il cedimento entro limiti accettabili, sia in termini di cedimento totale a lungo termine, che in termini di cedimento residuo dopo il termine dei lavori.

Per il caso particolare si prevede solamente una bonifica del terreno in sito al di sotto del rilevato, con scavo e sostituzione con materiale granulare selezionato ben compattato per uno spessore di 2.0 m. Tale intervento è sufficiente in quanto nella zona non sono presenti dissesti o materiali particolarmente cedevoli.

8.3.2. Mesh, stratigrafia e falda

La mesh e la stratigrafia sono mostrate di seguito in Figura 16. La stratigrafia è stata presa in sezione facendo riferimento a quanto riportato sul profilo geotecnico e sulle sezioni geotecniche. La falda è stata considerata a livelli “standard”, ovvero a quanto riportato sul profilo geotecnico; la falda si trova ad una profondità variabile tra 3.5 m e 6.5 m da piano campagna.

8.3.3. Modelli costitutivi e parametri geotecnici caratteristici

Per tutti gli strati di terreno naturale si è fatto riferimento ad un modello costitutivo “Soft-Soil”, dove la cedevolezza è governata dai coefficienti di compressibilità in primo carico, in scarico e ricarico e dal grado di sovraconsolidazione, con un modulo corrente quindi variabile in relazione allo stato tensionale corrente. I parametri geotecnici caratteristici utilizzati sono quelli dichiarati in Tabella 8. La permeabilità è stata presa pari a 10^{-8} m/s.

Per i materiali costituenti la bonifica e il rilevato si è invece fatto riferimento ad un modello costitutivo “Mohr-Coulomb”. I parametri geotecnici caratteristici utilizzati sono quelli dichiarati in Tabella 7. La permeabilità è stata presa pari a 10^{-4} m/s.

8.3.4. Carichi

Nelle analisi effettuate per la valutazione dei cedimenti non sono stati considerati sovraccarichi di tipo variabile.

8.3.5. Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono quelle “standard” automaticamente impostate nel codice di calcolo, ovvero spostamenti orizzontali bloccati ai bordi verticali del modello e spostamenti verticali bloccati alla base del modello.

Le condizioni idrauliche al contorno sono quelle “standard” automaticamente impostate nel codice di calcolo, ovvero moto di filtrazione consentito ai bordi verticali ma impedita alla base del modello.

8.3.6. Fasi di calcolo

Le fasi di costruzione simulate nel calcolo sono le seguenti:

1. Generazione dello stato tensionale iniziale con piano campagna attuale;
2. Scavo e sostituzione fino a 2 m di profondità per bonifica;
3. Costruzione del rilevato sino all'altezza di progetto (durata 180 giorni)
4. Attesa 1 anno per la stima dei cedimenti a fine costruzione rilevato, prima della messa in esercizio dell'autostrada;
5. Attesa 50 anni per la stima dei cedimenti a lungo termine.

Le prime due fasi sono state effettuate senza considerare la consolidazione (a "lungo termine"), mentre per le successive la consolidazione è stata considerata assegnando dei tempi compatibili con quelli di costruzione di un rilevato autostradale. I cedimenti sono valutati nel seguito a partire dall'inizio della suddetta fase 3.

8.3.7. Risultati

I risultati delle analisi FEM per la stima dei cedimenti sono riportati nelle figure seguenti, in particolare:

- In Figura 17 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 4 di cui sopra;
- In Figura 18 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 5 di cui sopra;
- In Figura 19 si riporta l'andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3 di cui sopra) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso;
- In Figura 20 si riporta l'andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5 di cui sopra.

In Tabella 15 si riportano i cedimenti stimati per un punto in asse al rilevato, alla base dello stesso (derivati da Figura 20) alla fine della costruzione dell'opera (prima della messa in esercizio, fine della fase 4 di cui sopra) e a "lungo termine" (fine della fase 5 di cui sopra). Nella stessa tabella si riporta il valore del cedimento residuo a "lungo termine" pari alla differenza fra i due precedenti.

Con riferimento ai risultati ottenuti sia in termini di valore assoluto (da inizio costruzione rilevato) che residuo dopo la messa in esercizio dell'opera, si ritiene che i valori di cedimento stimati siano compatibili con la funzionalità dell'opera. I cedimenti che si verificano all'interno del corpo del rilevato sono dell'ordine di meno di 1 cm (vedi Figura 19) e possono essere "recuperati" durante la costruzione del rilevato stesso.

Tabella 15: Sintesi sulla valutazione dei cedimenti

Sezione di calcolo	Cedimento a base rilevato, in asse rilevato prima della messa in esercizio (cm)	Cedimento a base rilevato, in asse rilevato a lungo termine (cm)	Cedimento residuo (cm)
RIL02 (km 0+700)	15.6	16.9	1.3

Output Version 2019.0.0.0

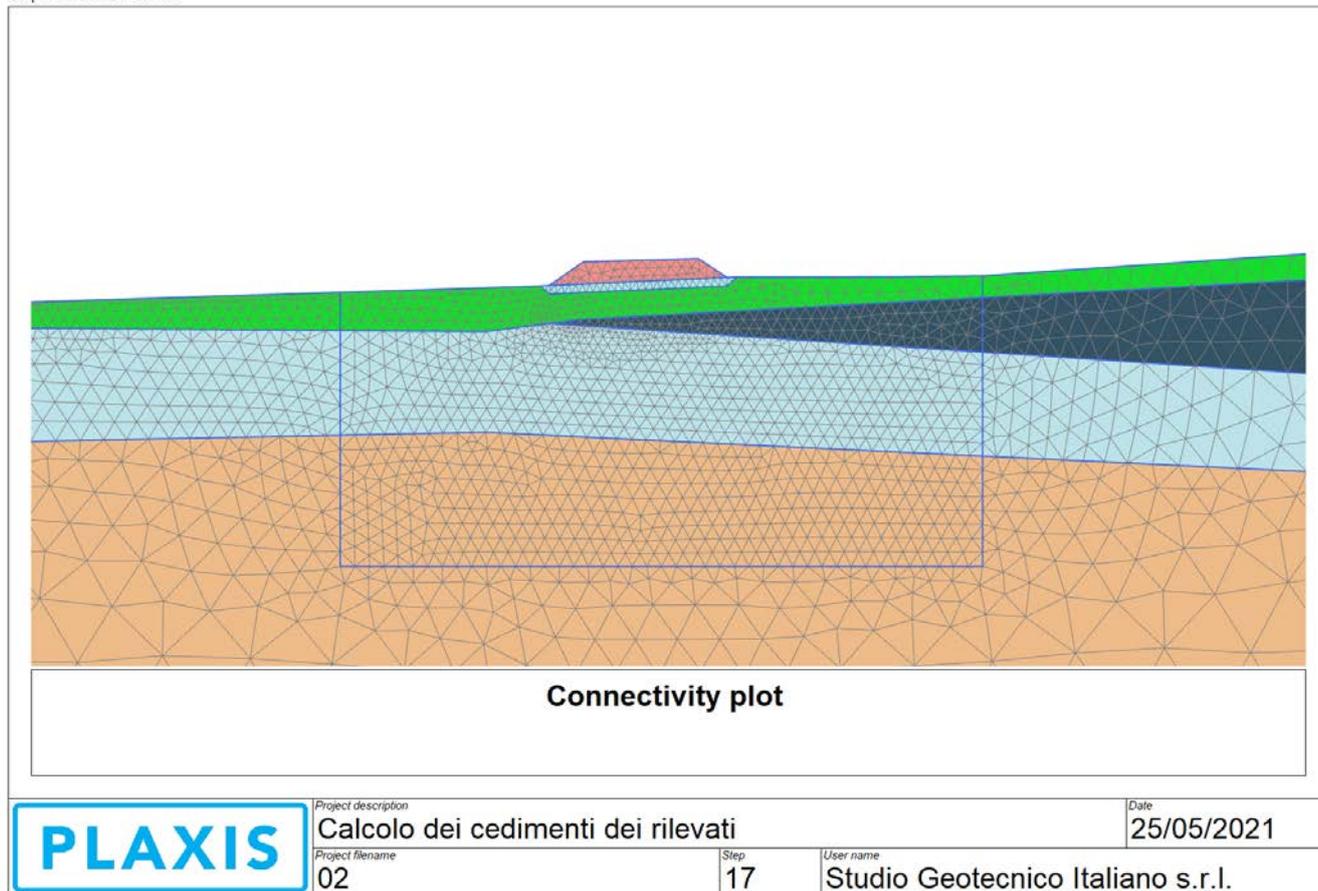


Figura 16 – Modello PLAXIS (con interventi)

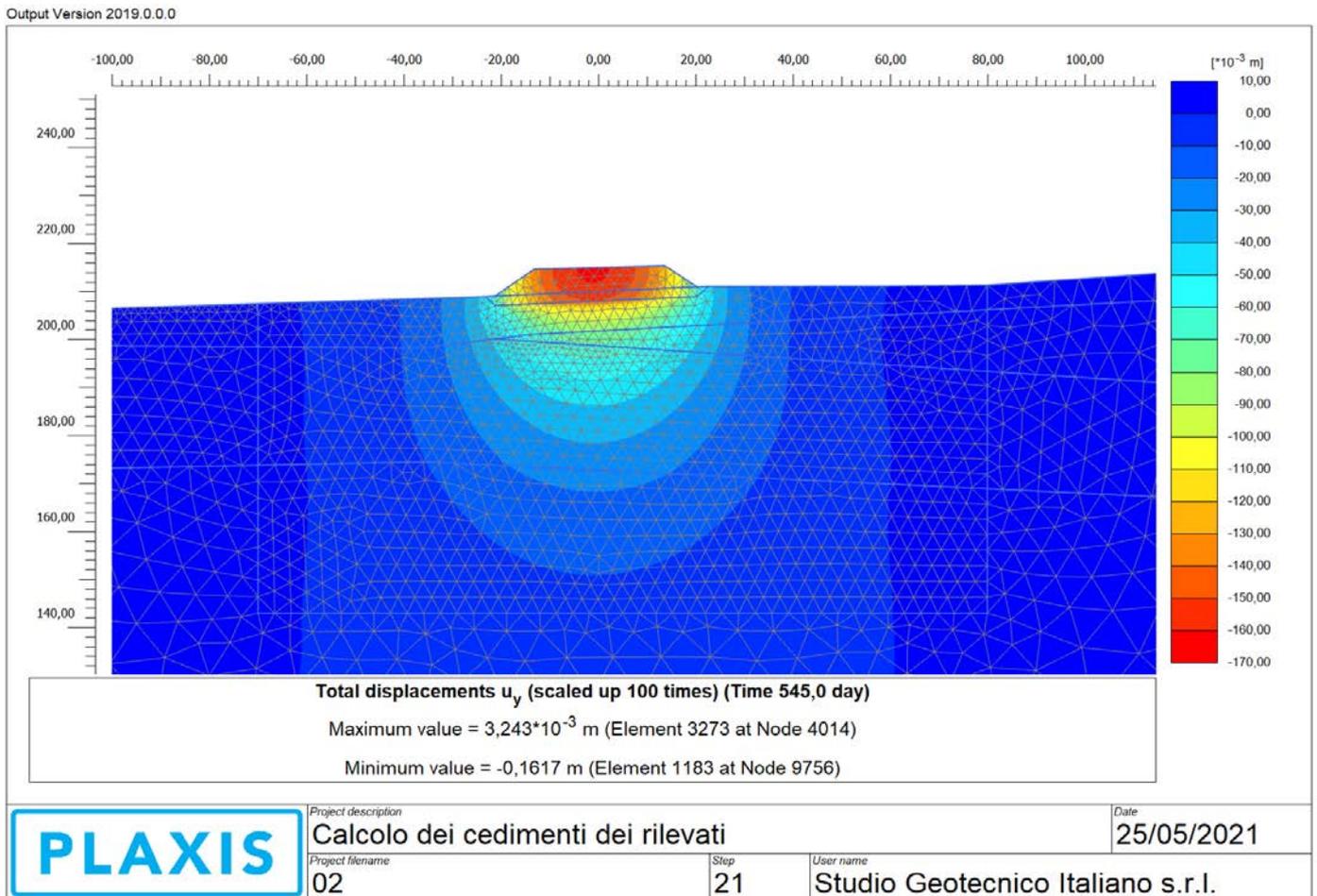


Figura 17: Modello PLAXIS con interventi – cedimenti del modello a fine fase 4

Output Version 2019.0.0.0

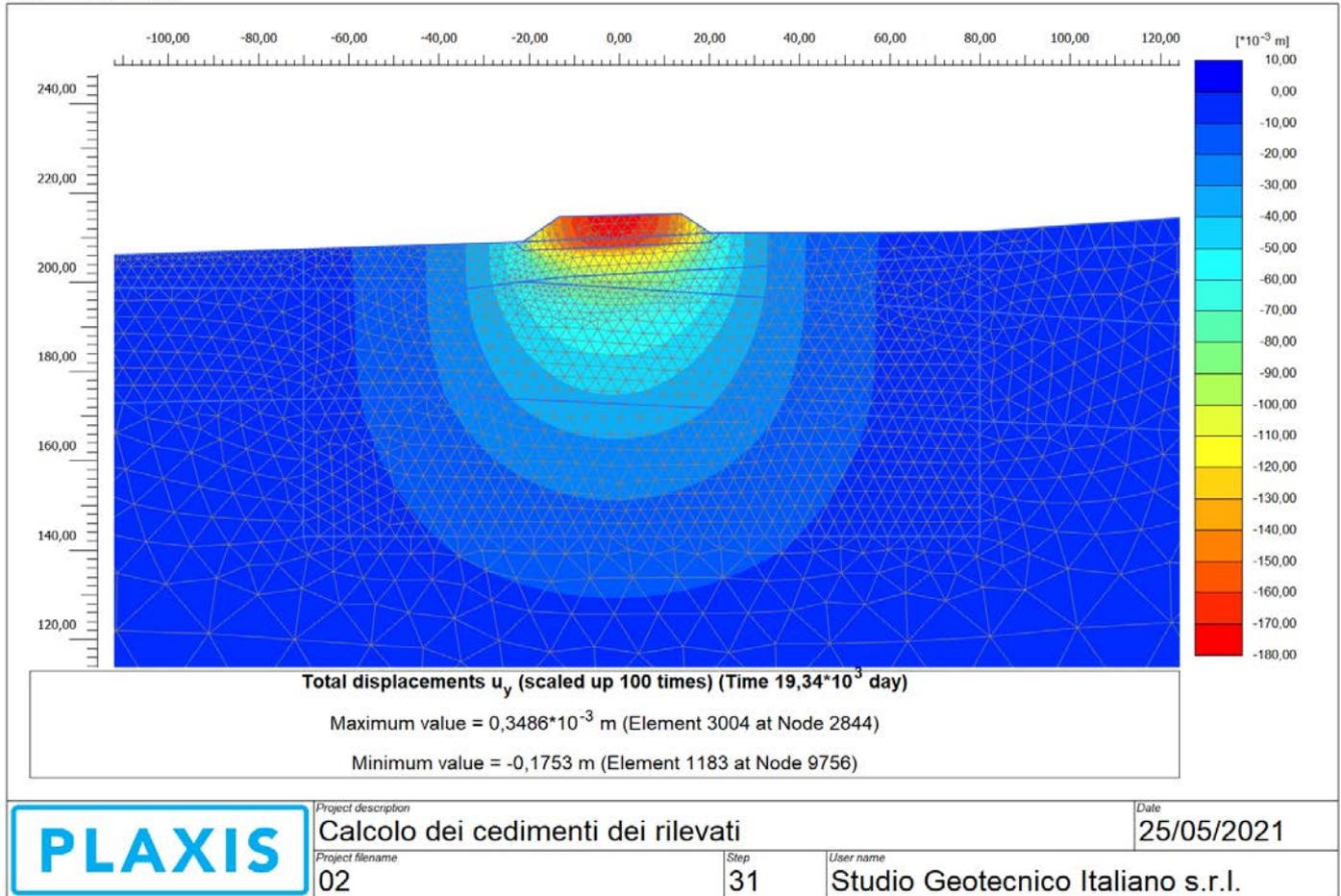


Figura 18 Modello PLAXIS con interventi – cedimenti del modello a fine fase 5

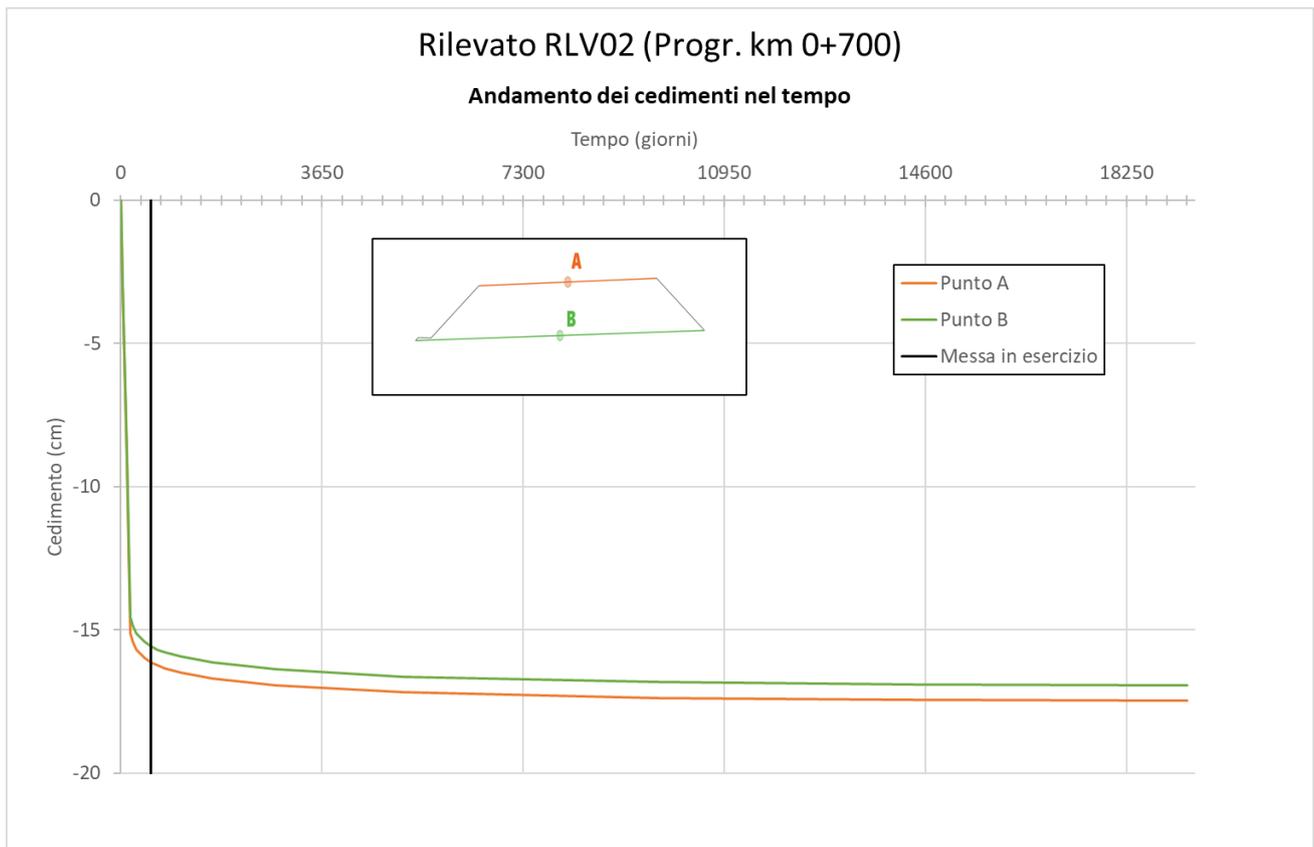


Figura 19 Modello PLAXIS con interventi – andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall’inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso

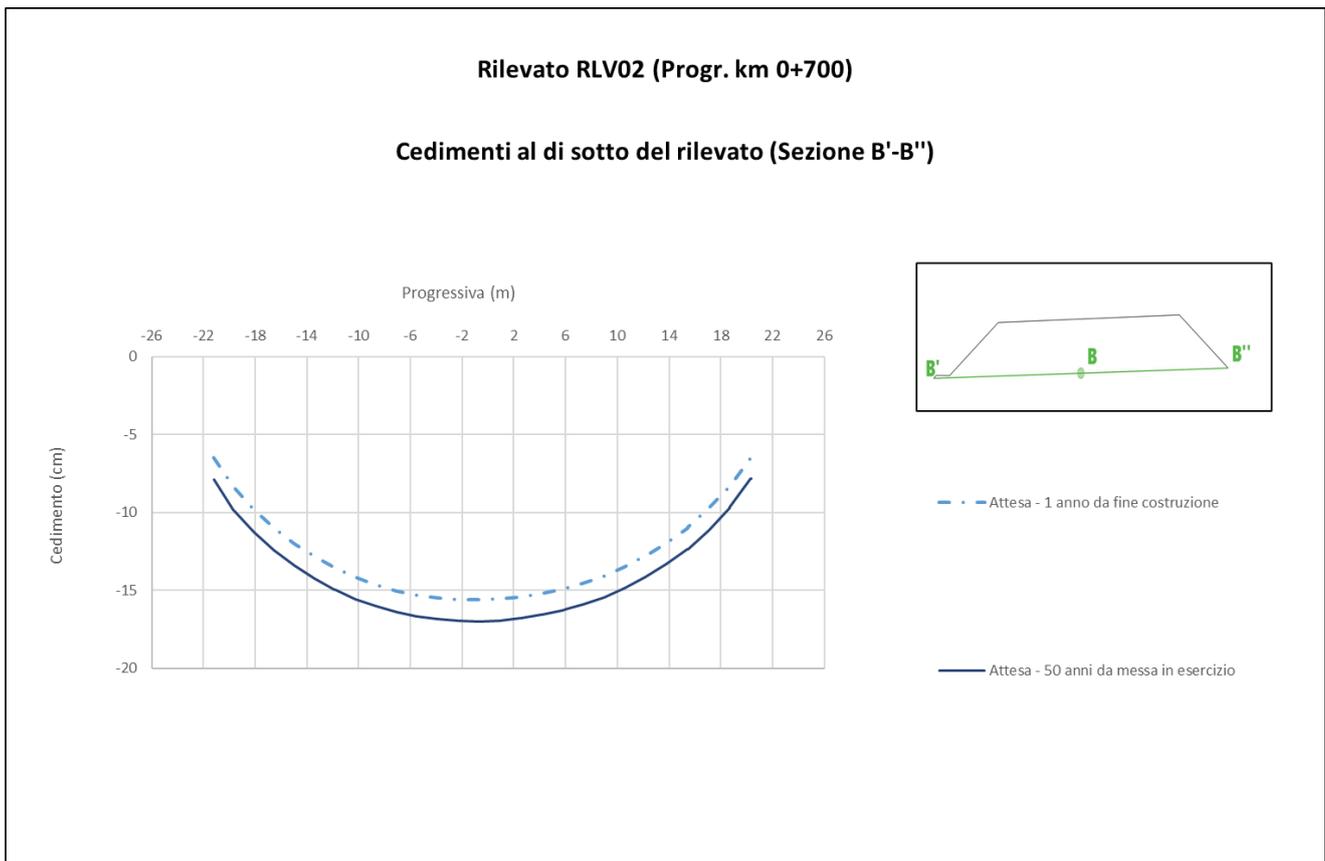


Figura 20 Modello PLAXIS con interventi – andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5

Tabella 16: Parametri geotecnici di calcolo dei materiali in sito

Unità	Prof. da [m da p.c.]	Prof. a [m da p.c.]	γ kN/m ³	φ' °	c' kPa	c_u kPa	Cc [-]	Cr [-]	e_0 [-]	OCR [-]
CCS	0	8	19	21	0	80 - 120	0.05	0.04	0.65	3
GES2	8	16	19	21	10	150	0.18	0.034	0.6	2
GES1	16	37	21	21	20	200	0.18	0.034	0.6	2
SAF	37	61	19	21	25	250	0.17	0.05	0.7	2

9.2. VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE

Per la verifica di stabilità globale del rilevato, è stato implementato un modello 2D tramite il codice di calcolo SLOPE/W descritto al paragrafo 6.2.1.

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.

Per completezza si riporta in Figura 22 l'analisi di stabilità del rilevato in assenza di interventi. Come si può notare i requisiti minimi di normativa in termini di stabilità del rilevato non sono garantiti. Nei successivi paragrafi si riportano le analisi di stabilità in presenza di interventi.

9.2.1. Verifiche SLU in condizioni statiche

In accordo a quanto dichiarato al paragrafo 3.1.1, le analisi sono state implementate in accordo all'Approccio 1 - Combinazione 2 e la verifica risulta soddisfatta per un fattore di sicurezza pari a $FS_{min}=1.1$.

In Tabella 17 si riporta il fattore di sicurezza calcolato e la figura di riferimento con indicazione del meccanismo critico associato ad esso; essendo $FS > 1.1$, **la verifica di stabilità globale in campo statico è soddisfatta.**

Tabella 17: Analisi di stabilità globale in campo statico

Sezione di calcolo	FS	Meccanismo di riferimento
RIL03 (km 1+500)	1.115	Figura 23

9.2.2. Verifiche SLU in condizioni sismiche

In accordo a quanto dichiarato al paragrafo 3.2, le analisi sono state implementate considerando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici e la verifica risulta soddisfatta per un fattore di sicurezza pari a $FS_{min}=1.2$.

In Tabella 18 si riporta il fattore di sicurezza calcolato e la figura di riferimento con indicazione del meccanismo critico associato ad esso; essendo $FS>1.2$, **la verifica di stabilità globale in campo pseudo statico è soddisfatta.**

Tabella 18: Analisi di stabilità globale in campo statico

Sezione di calcolo	FS	Meccanismo di riferimento
RIL03 (km 1+500)	1.427 (kv>0)	Figura 24 (kv>0)
	1.420 (kv<0)	Figura 25 (kv<0)

**AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
 TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)**
**Analisi di stabilità rilevati
 Sez. 1+500**
Condizioni statica

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 32 °	Piezometric Line: 1
Name: CCS	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: GES2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 8 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: GES1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 21 kN/m ³	Cohesion: 16 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1

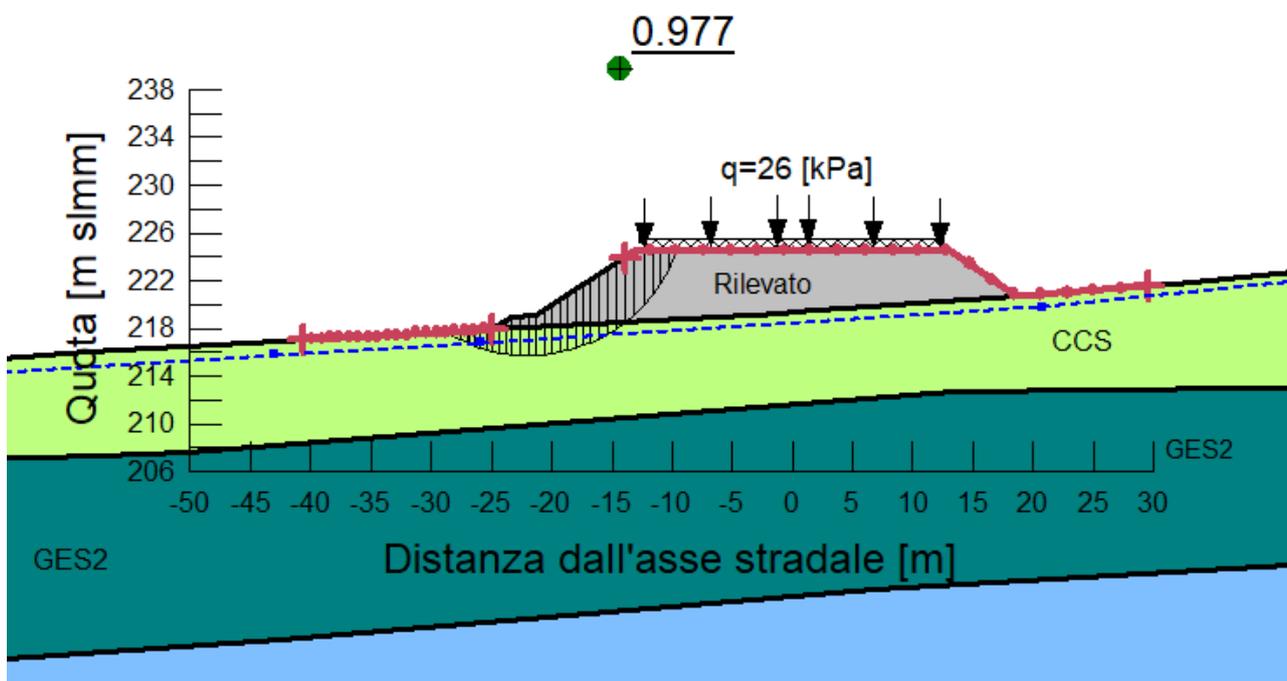


Figura 22: Modello SLOPE (senza interventi) – Analisi di stabilità in condizioni statiche

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 1+500
Condizioni statica

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 32 ° Piezometric Line: 1
 Name: CCS Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: Bonifico Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 30.2 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 8 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES1 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 21 kN/m³ Cohesion: 16 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1

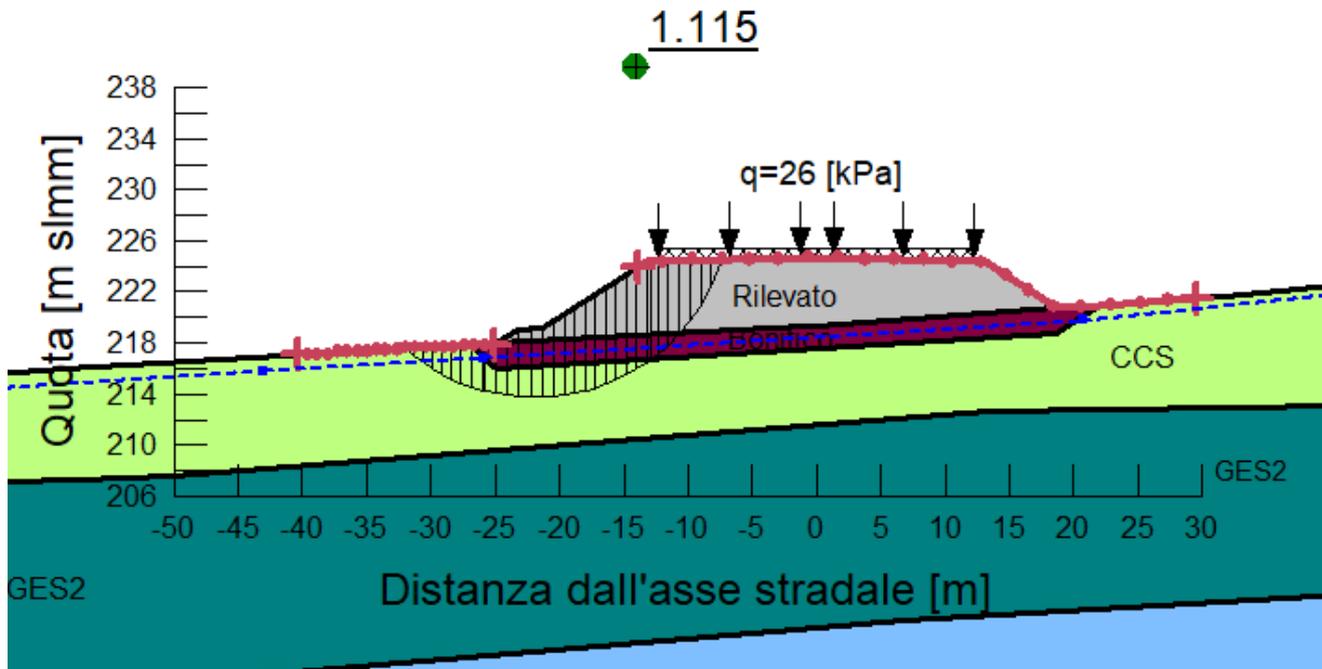
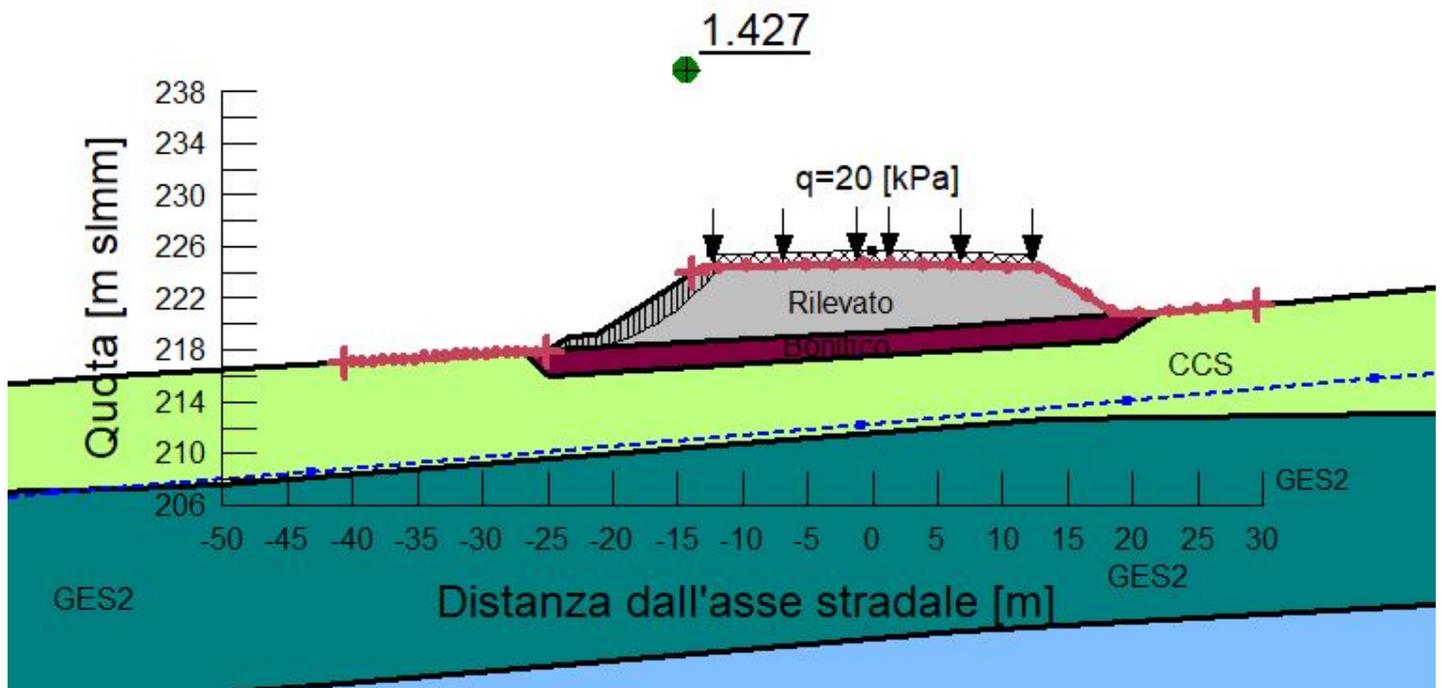


Figura 23: Modello SLOPE (con interventi) – Analisi di stabilità in condizioni statiche

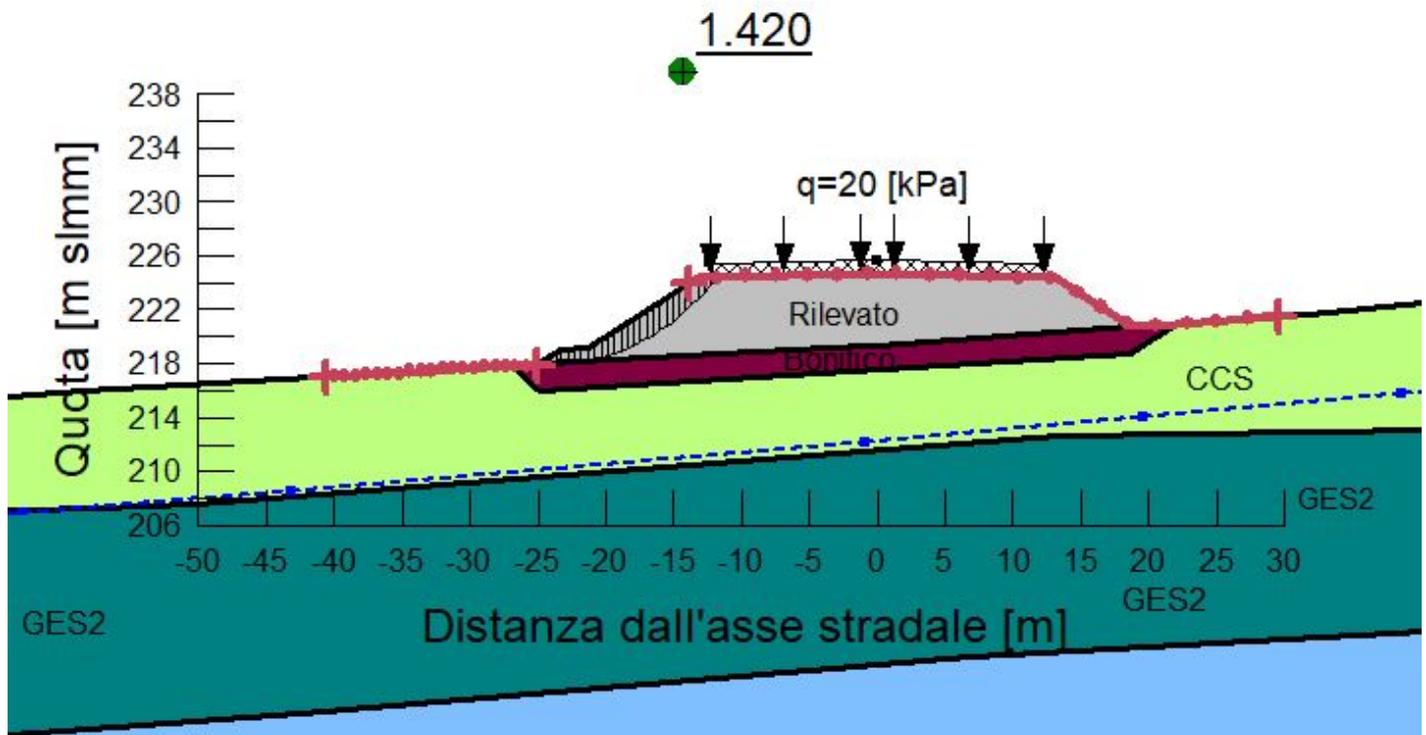
**AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
 TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)**
**Analisi di stabilità rilevati
 Sez. 1+500**
Condizioni sismica $kh=0.044$; $kv=0.022$

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 38 °	Piezometric Line: 1
Name: CCS	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: Bonifico	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 36 °	Piezometric Line: 1
Name: GES2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 10 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: GES1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 21 kN/m ³	Cohesion: 20 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1


 Figura 24: Modello SLOPE (con interventi) – Analisi di stabilità in condizioni sismiche ($kv>0$)

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 1+500
Condizioni sismica $k_h=0.044$; $k_v=-0.022$

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 38 °	Piezometric Line: 1
Name: CCS	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: Bonifico	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 36 °	Piezometric Line: 1
Name: GES2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 10 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: GES1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 21 kN/m ³	Cohesion: 20 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1


 Figura 25: Modello SLOPE (con interventi) – Analisi di stabilità sismica ($k_v < 0$)

9.3. VERIFICHE SLE

9.3.1. Introduzione e descrizione interventi

Per la stima dei cedimenti al disotto del rilevato, è stato implementato un modello 2D ad elementi finiti tramite il codice di calcolo PLAXIS descritto al paragrafo 6.2.2.

Le analisi sono finalizzate alla stima dei cedimenti attesi nel tempo e alla stima del cedimento residuo definito come la differenza tra il cedimento calcolato nella fase di “messa in esercizio” e i cedimenti attesi a lungo termine, considerando una durata significativa di 50 anni dopo la costruzione del rilevato.

La progettazione e il dimensionamento degli interventi hanno avuto come criterio quello di limitare il cedimento entro limiti accettabili, sia in termini di cedimento totale a lungo termine, che in termini di cedimento residuo dopo il termine dei lavori.

Per il caso particolare si prevede solamente una bonifica del terreno in sito al di sotto del rilevato, con scavo e sostituzione con materiale granulare selezionato ben compattato per uno spessore di 2.0 m. Tale intervento è sufficiente in quanto nella zona non sono presenti dissesti o materiali particolarmente cedevoli.

9.3.2. Mesh, stratigrafia e falda

La mesh e la stratigrafia sono mostrate di seguito in Figura 26. La stratigrafia è stata presa in sezione facendo riferimento a quanto riportato sul profilo geotecnico e sulle sezioni geotecniche. La falda è stata considerata a livelli “standard”, ovvero a quanto riportato sul profilo geotecnico; la falda è variabile tra 5.5 m e 8.5 m di profondità rispetto al piano campagna.

9.3.3. Modelli costitutivi e parametri geotecnici caratteristici

Per tutti gli strati di terreno naturale si è fatto riferimento ad un modello costitutivo “Soft-Soil”, dove la cedevolezza è governata dai coefficienti di compressibilità in primo carico, in scarico e ricarico e dal grado di sovraconsolidazione, con un modulo corrente quindi variabile in relazione allo stato tensionale corrente. I parametri geotecnici caratteristici utilizzati sono quelli dichiarati in Tabella 8. La permeabilità è stata presa pari a 10^{-8} m/s.

Per i materiali costituenti la bonifica e il rilevato si è invece fatto riferimento ad un modello costitutivo “Mohr-Coulomb”. I parametri geotecnici caratteristici utilizzati sono quelli dichiarati in Tabella 7. La permeabilità è stata presa pari a 10^{-4} m/s.

9.3.4. Carichi

Nelle analisi effettuate per la valutazione dei cedimenti non sono stati considerati sovraccarichi di tipo variabile.

9.3.5. Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono quelle “standard” automaticamente impostate nel codice di calcolo, ovvero spostamenti orizzontali bloccati ai bordi verticali del modello e spostamenti verticali bloccati alla base del modello.

Le condizioni idrauliche al contorno sono quelle “standard” automaticamente impostate nel codice di calcolo, ovvero moto di filtrazione consentito ai bordi verticali ma impedita alla base del modello.

9.3.6. Fasi di calcolo

Le fasi di costruzione simulate nel calcolo sono le seguenti:

1. Generazione dello stato tensionale iniziale con piano campagna attuale;
2. Scavo e sostituzione fino a 2 m di profondità per bonifica;
3. Costruzione del rilevato sino all'altezza di progetto (durata 180 giorni)
4. Attesa 1 anno per la stima dei cedimenti a fine costruzione rilevato, prima della messa in esercizio dell'autostrada;
5. Attesa 50 anni per la stima dei cedimenti a lungo termine.

Le prime due fasi sono state effettuate senza considerare la consolidazione (a "lungo termine"), mentre per le successive la consolidazione è stata considerata assegnando dei tempi compatibili con quelli di costruzione di un rilevato autostradale. I cedimenti sono valutati nel seguito a partire dall'inizio della suddetta fase 3.

9.3.7. Risultati

I risultati delle analisi FEM per la stima dei cedimenti sono riportati nelle figure seguenti, in particolare:

- In Figura 27 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 4 di cui sopra;
- In Figura 28 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 5 di cui sopra;
- In Figura 29 si riporta l'andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3 di cui sopra) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso;
- In Figura 30 si riporta l'andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5 di cui sopra.

In Tabella 19 si riportano i cedimenti stimati per un punto in asse al rilevato, alla base dello stesso (derivati da Figura 30) alla fine della costruzione dell'opera (prima della messa in esercizio, fine della fase 4 di cui sopra) e a "lungo termine" (fine della fase 5 di cui sopra). Nella stessa tabella si riporta il valore del cedimento residuo a "lungo termine" pari alla differenza fra i due precedenti.

Con riferimento ai risultati ottenuti sia in termini di valore assoluto (da inizio costruzione rilevato) che residuo dopo la messa in esercizio dell'opera, si ritiene che i valori di cedimento stimati siano compatibili con la funzionalità dell'opera. I cedimenti che si verificano all'interno del corpo del rilevato sono dell'ordine di meno di 1 cm (vedi Figura 29) e possono essere "recuperati" durante la costruzione del rilevato stesso.

Tabella 19: Sintesi sulla valutazione dei cedimenti

Sezione di calcolo	Cedimento a base rilevato, in asse rilevato prima della messa in esercizio (cm)	Cedimento a base rilevato, in asse rilevato a lungo termine (cm)	Cedimento residuo (cm)
RIL03 (km 1+500)	14.2	14.8	0.6

Output Version 2019.0.0.0

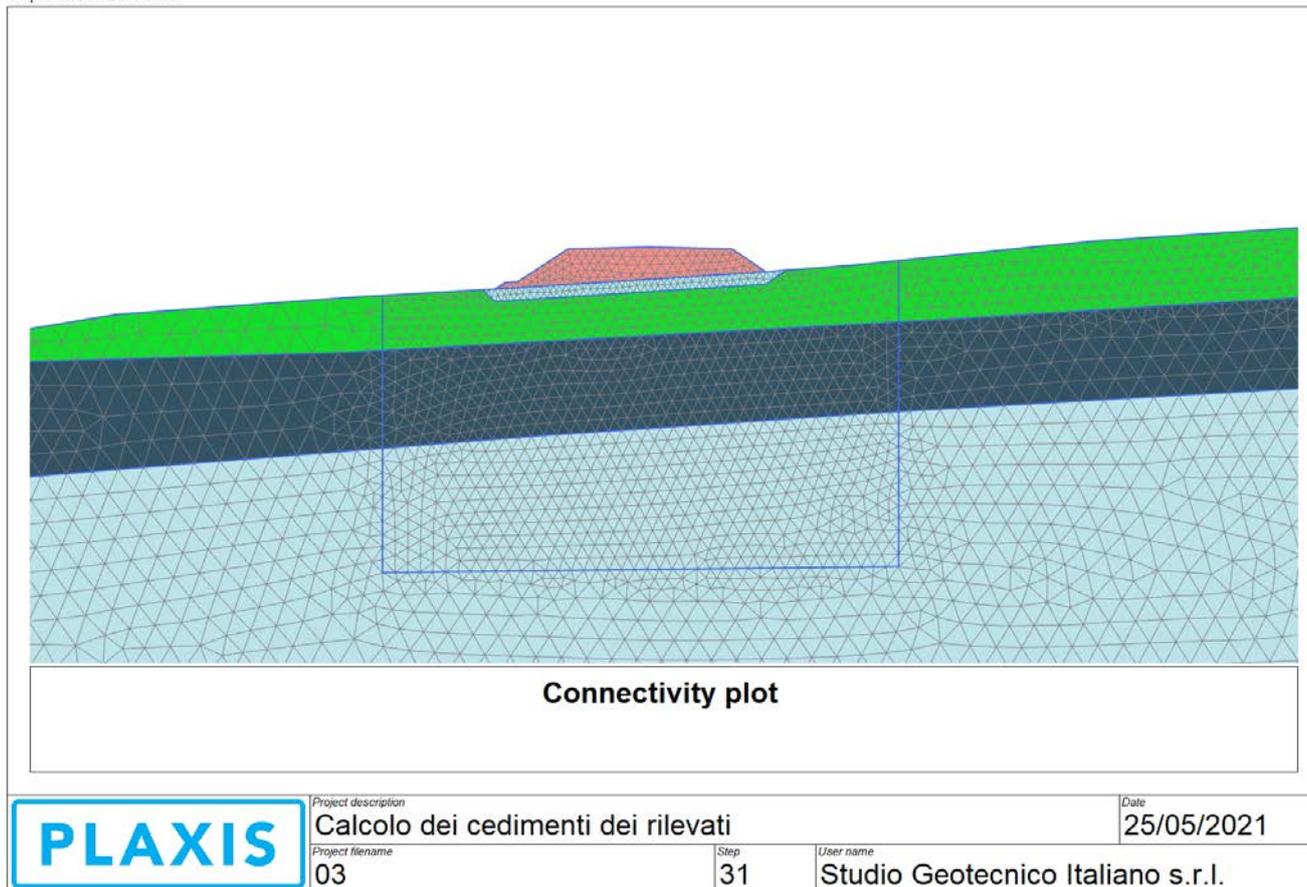


Figura 26 – Modello PLAXIS (con interventi)

Output Version 2019.0.0.0

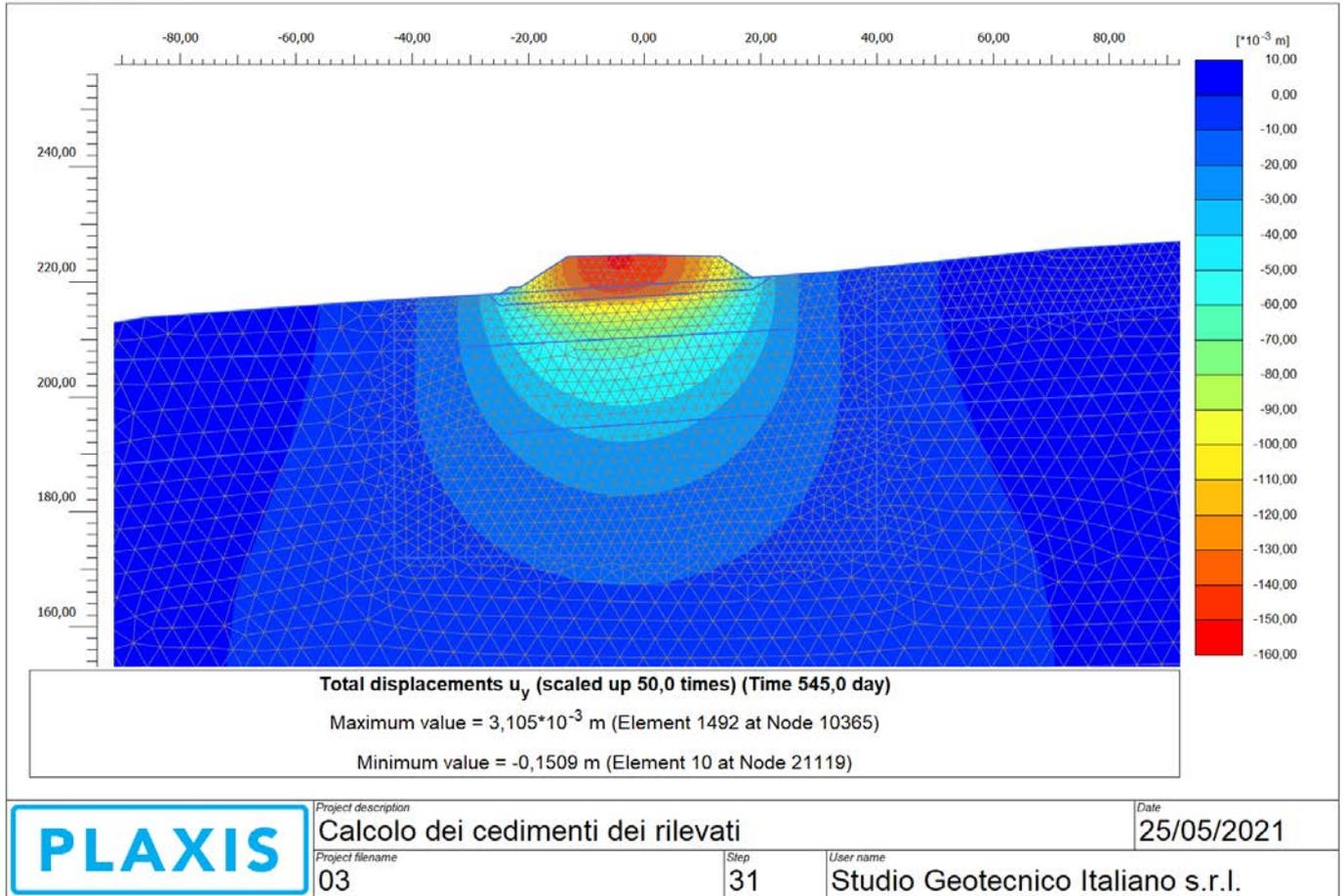


Figura 27: Modello PLAXIS con interventi – cedimenti del modello a fine fase 4

Output Version 2019.0.0.0

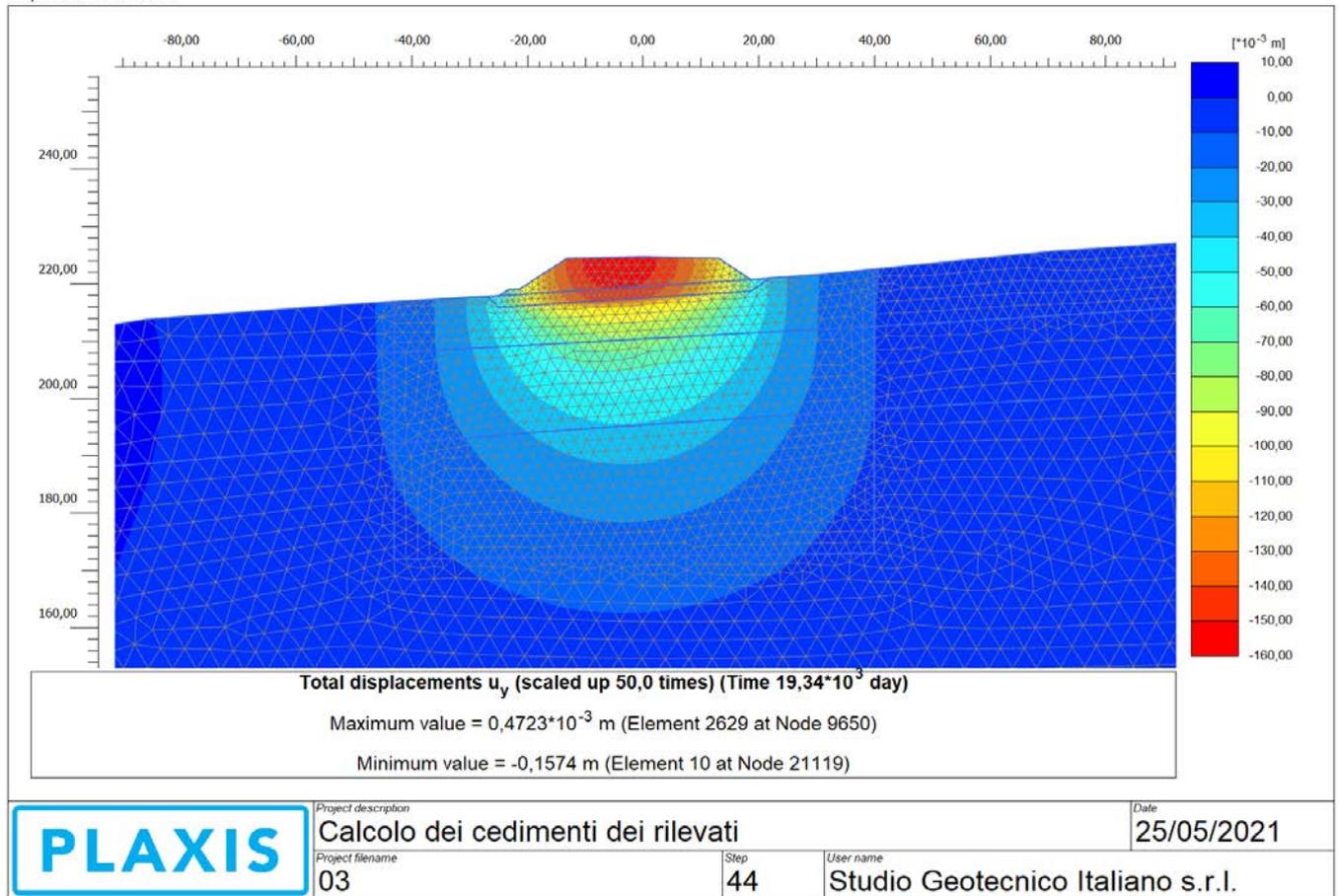


Figura 28 Modello PLAXIS con interventi – cedimenti del modello a fine fase 5

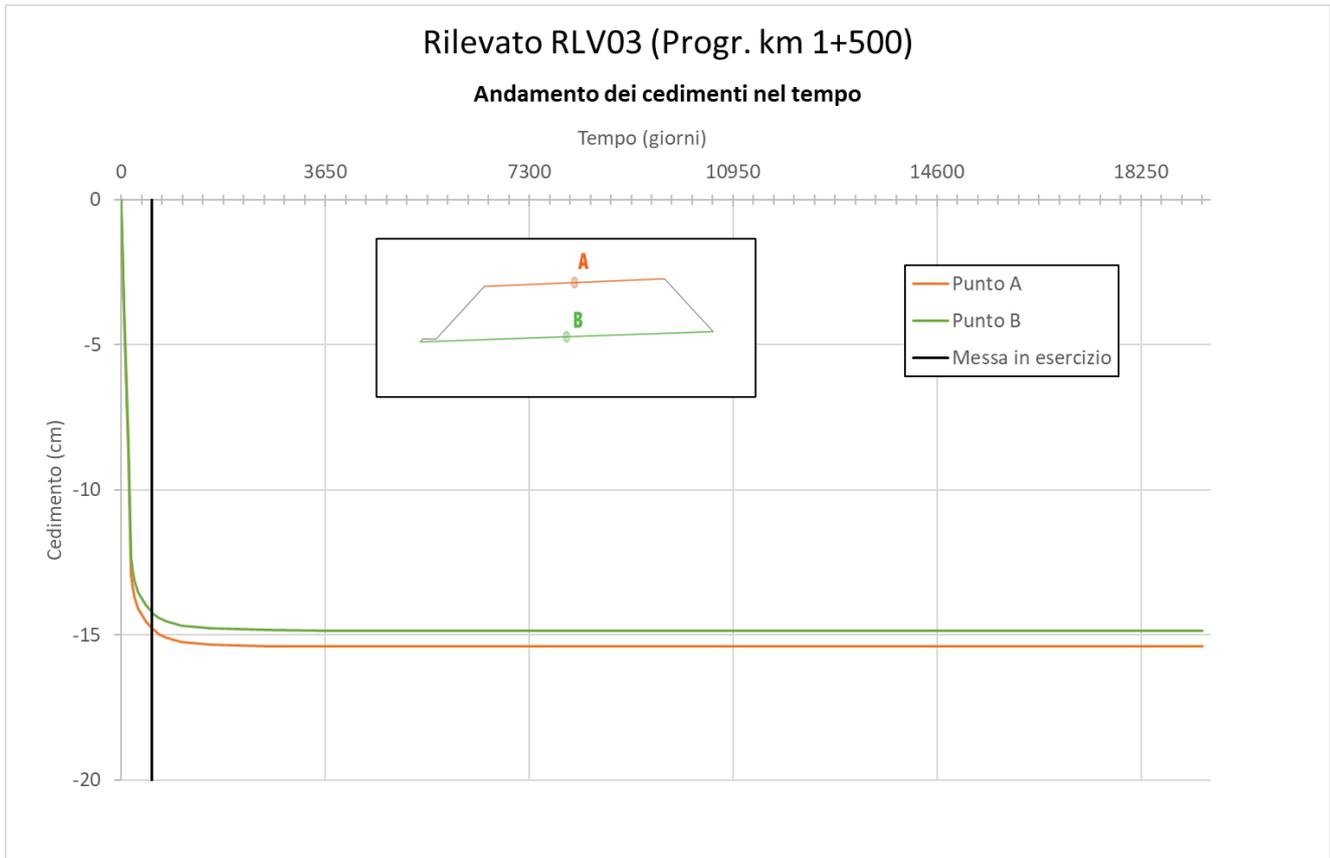


Figura 29 Modello PLAXIS con interventi – andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso

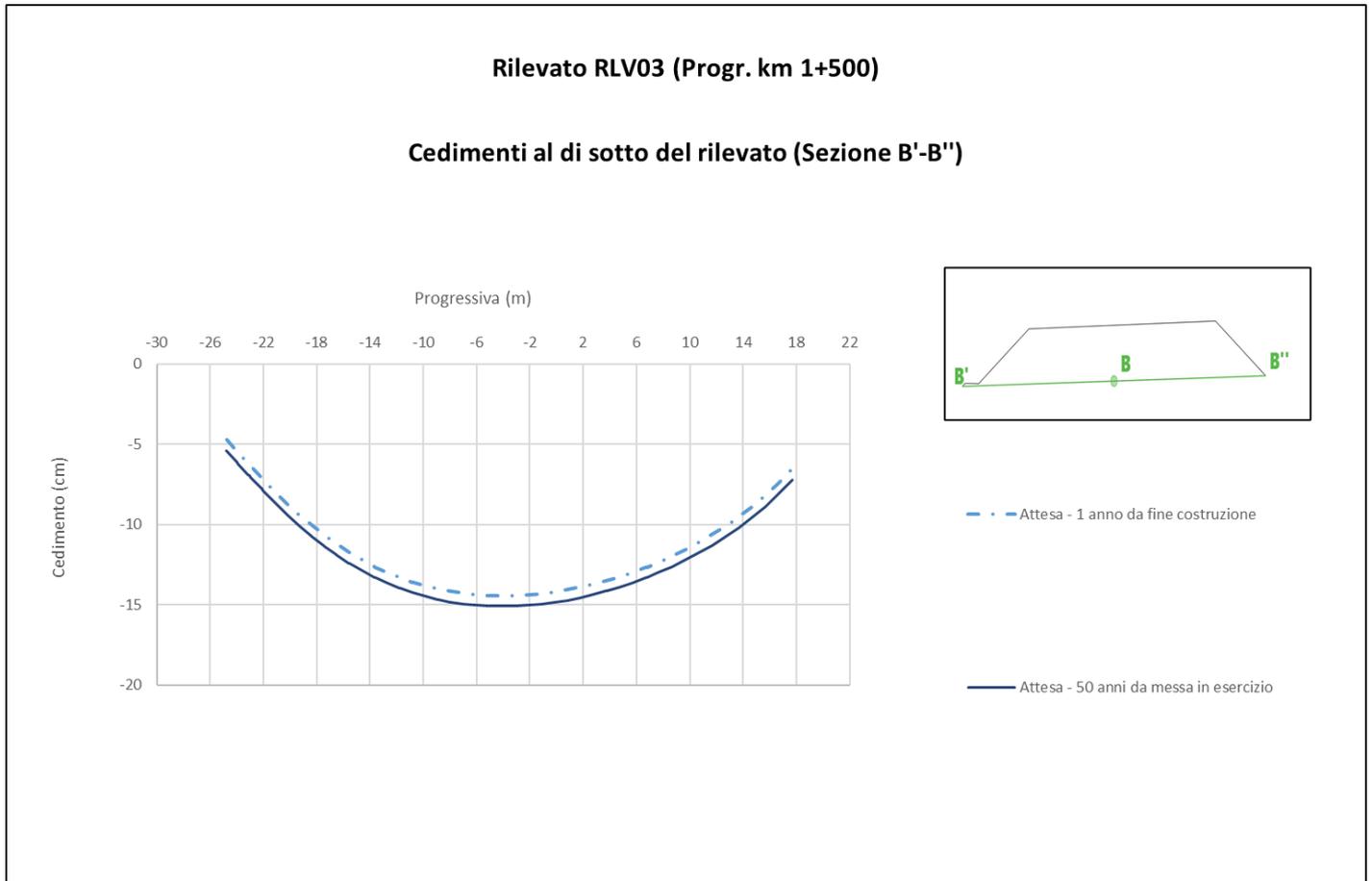


Figura 30 Modello PLAXIS con interventi – andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5

la bassa permeabilità dei materiali fa saturare rapidamente il terreno in corrispondenza degli eventi piovosi.

Per le verifiche SLU in condizioni sismiche la falda di progetto è invece stata assunta variabile tra 5 m e 8 m di profondità, come rappresentata sul profilo geotecnico.

Per le verifiche SLE (valutazione dei cedimenti), la falda di progetto è stata assunta sempre variabile tra 5 m e 8 m di profondità, come rappresentata sul profilo geotecnico.

Per maggiore dettaglio si rimanda alla relazione geotecnica di progetto (Doc. Rif. [9.]).

Tabella 20: Parametri geotecnici di calcolo dei materiali in sito

Unità	Prof. da [m da p.c.]	Prof. a [m da p.c.]	γ kN/m ³	φ' °	c' kPa	c_u kPa	Cc [-]	Cr [-]	e_0 [-]	OCR [-]
CCS	0	14	19	21	0	80 - 120	0.05	0.04	0.65	3
GES2	14	31	19	21	10	150	0.18	0.034	0.6	2
GES1	31	46	21	21	20	200	0.18	0.034	0.6	2
SAF	46	71	19	21	25	250	0.17	0.05	0.7	2

10.2. VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE

Per la verifica di stabilità globale del rilevato, è stato implementato un modello 2D tramite il codice di calcolo SLOPE/W descritto al paragrafo 6.2.1.

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.

Per completezza si riporta in Figura 32 l'analisi di stabilità del rilevato in assenza di interventi. Come si può notare i requisiti minimi di normativa in termini di stabilità del rilevato non sono garantiti. Nei successivi paragrafi si riportano le analisi di stabilità in presenza di interventi.

Per il terreno trattato con inclusioni rigide è stata stimata una resistenza equivalente stimata come segue:

- Classe calcestruzzo: C16/20;
- $f_{ck} = 16$ MPa;
- $f_{cd} = 16/1.5 = 10.7$ MPa;
- $\tau_{max} = 10.7 \cdot 0.85/2 = 4.55$ MPa;
- $c_{eq} = \tau_{max} \cdot A_{incl} / A_{tot} = 4550 \cdot 0.28 / 5.3 = 240$ kPa;

Dove

- A_{incl} = area della sezione dell'inclusione di diametro 0.6m;
- A_{tot} = area di influenza della singola inclusione con interasse 3.5 m a maglia quinconce.

Tale resistenza equivalente viene comunque fattorizzata nelle analisi di stabilità globale secondo il coefficiente $\gamma_M = 1.25$ da normativa, quindi:

- $c_{eq,k} = 240$ kPa;
- $c_{eq,d} = 240/1.25 = 192$ kPa;

A tale resistenza viene comunque associato l'angolo di attrito del materiale naturale che non viene influenzato dalla presenza delle colonne.

10.2.1. Verifiche SLU in condizioni statiche

In accordo a quanto dichiarato al paragrafo 3.1.1, le analisi sono state implementate in accordo all'Approccio 1 - Combinazione 2 e la verifica risulta soddisfatta per un fattore di sicurezza pari a $FS_{min}=1.1$.

In Tabella 21 si riportano il fattore di sicurezza calcolato e la figura di riferimento con indicazione del meccanismo critico associato ad esso; essendo $FS > 1.1$, **la verifica di stabilità globale in campo statico è soddisfatta.**

Tabella 21: Analisi di stabilità globale in campo statico

Sezione di calcolo	FS	Meccanismo di riferimento
RIL04 (km 1+720)	1.269	Figura 33

10.2.2. Verifiche SLU in condizioni sismiche

In accordo a quanto dichiarato al paragrafo 3.2, le analisi sono state implementate considerando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici e la verifica risulta soddisfatta per un fattore di sicurezza pari a $FS_{min}=1.2$.

In Tabella 22 si riportano il fattore di sicurezza calcolato e la figura di riferimento con indicazione del meccanismo critico associato ad esso; essendo $FS > 1.2$, **la verifica di stabilità globale in campo pseudo statico è soddisfatta.**

Tabella 22: Analisi di stabilità globale in campo statico

Sezione di calcolo	FS	Meccanismo di riferimento
RIL04 (km 1+720)	1.375 (kv>0)	Figura 34 (kv>0)
	1.368 (kv<0)	Figura 35 (kv<0)

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 1+720
Condizioni statiche

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 32 ° Piezometric Line: 1
 Name: CCS Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 8 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES1 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 21 kN/m³ Cohesion: 16 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: SAF Model: Undrained (Phi=0) Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 178.6 kPa Piezometric Line: 1
 Name: Strato di ripartizione Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 30.2 ° Piezometric Line: 1

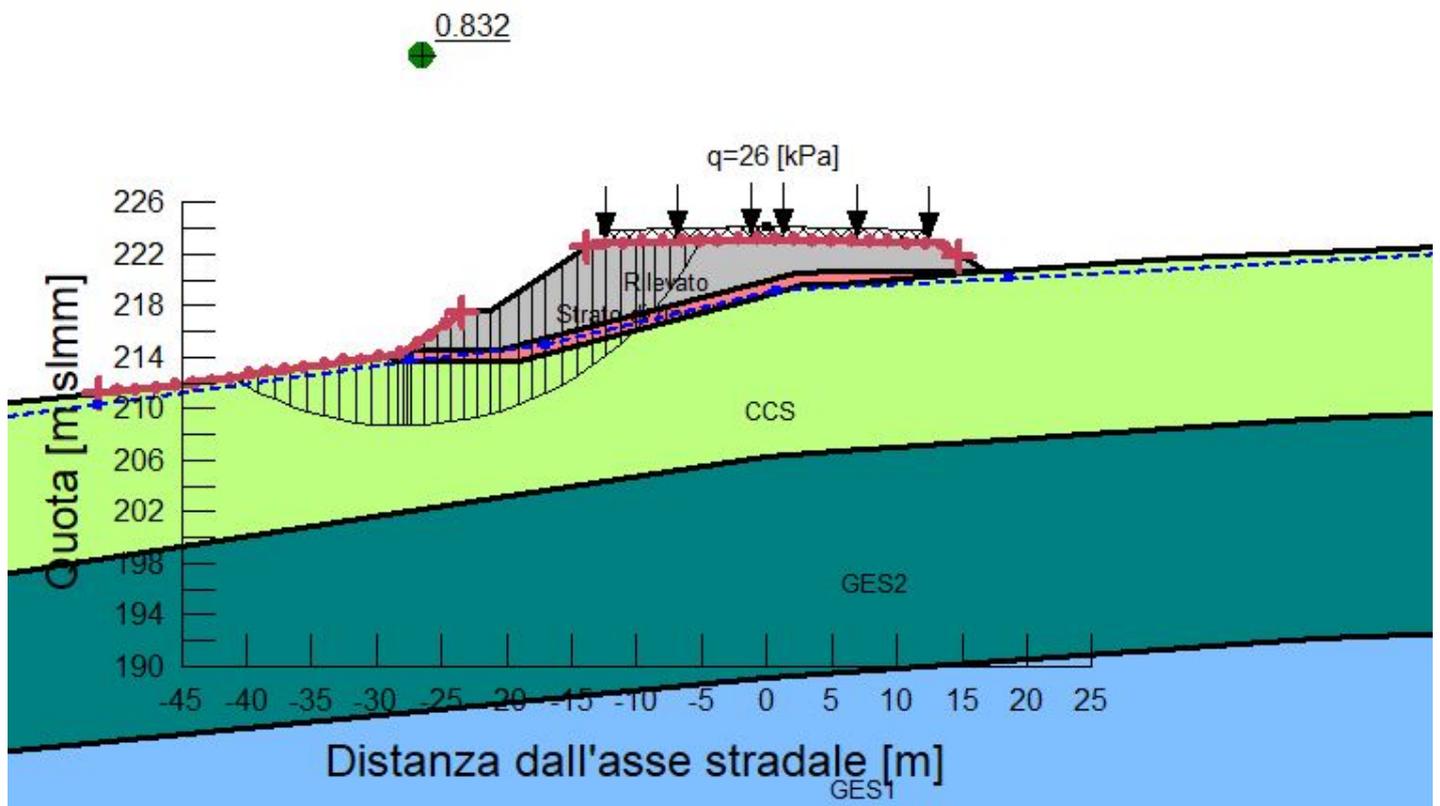


Figura 32: Modello SLOPE (senza interventi) – Sezione km 1+720 – Analisi di stabilità in condizioni statiche

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 1+720
Condizioni statiche

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 32 ° Piezometric Line: 1
 Name: CCS Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: CFA Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19.3 kN/m³ Cohesion: 192 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 8 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES1 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 21 kN/m³ Cohesion: 16 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: SAF Model: Undrained (Phi=0) Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 178.6 kPa Piezometric Line: 1
 Name: Strato di ripartizione Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 30.2 ° Piezometric Line: 1

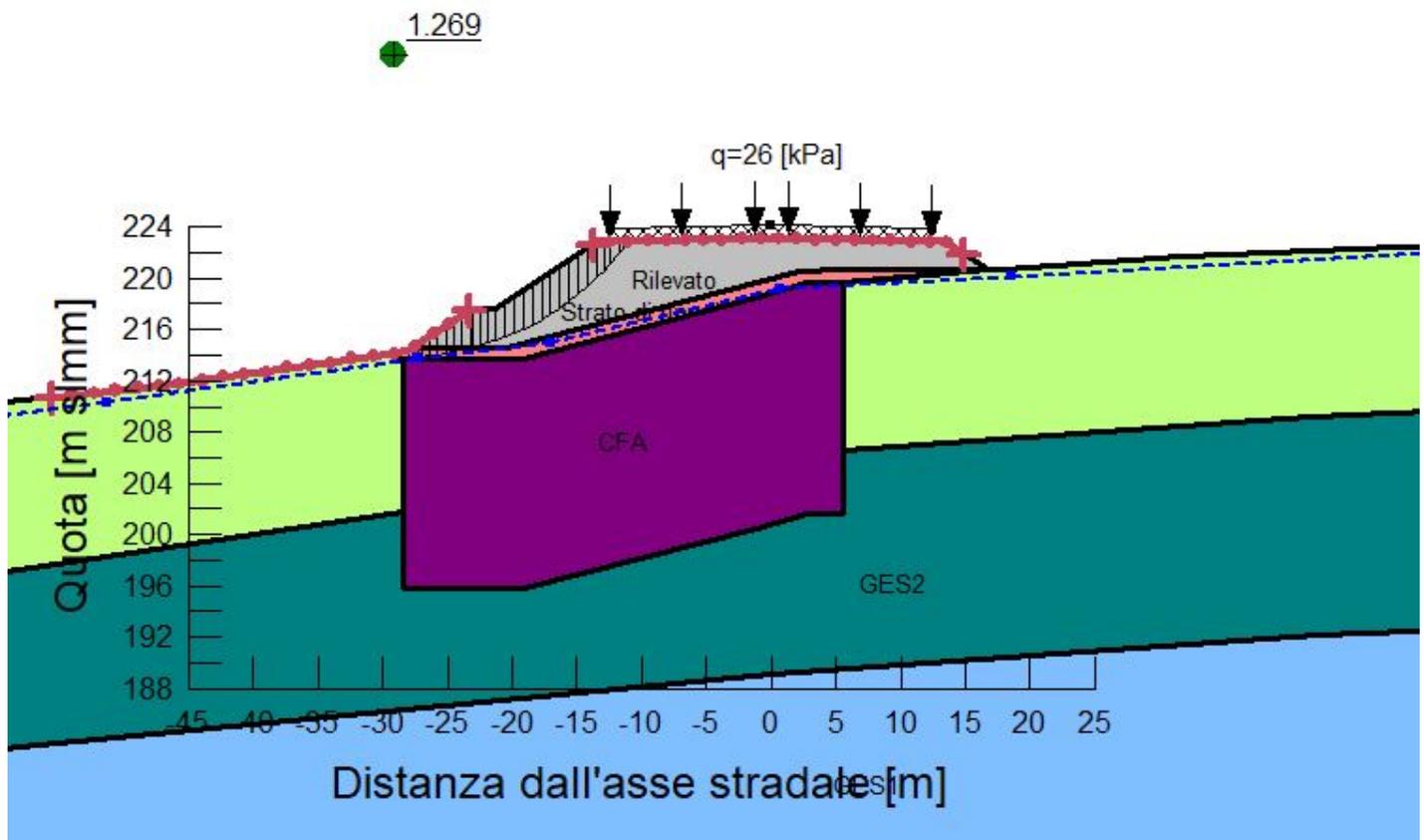
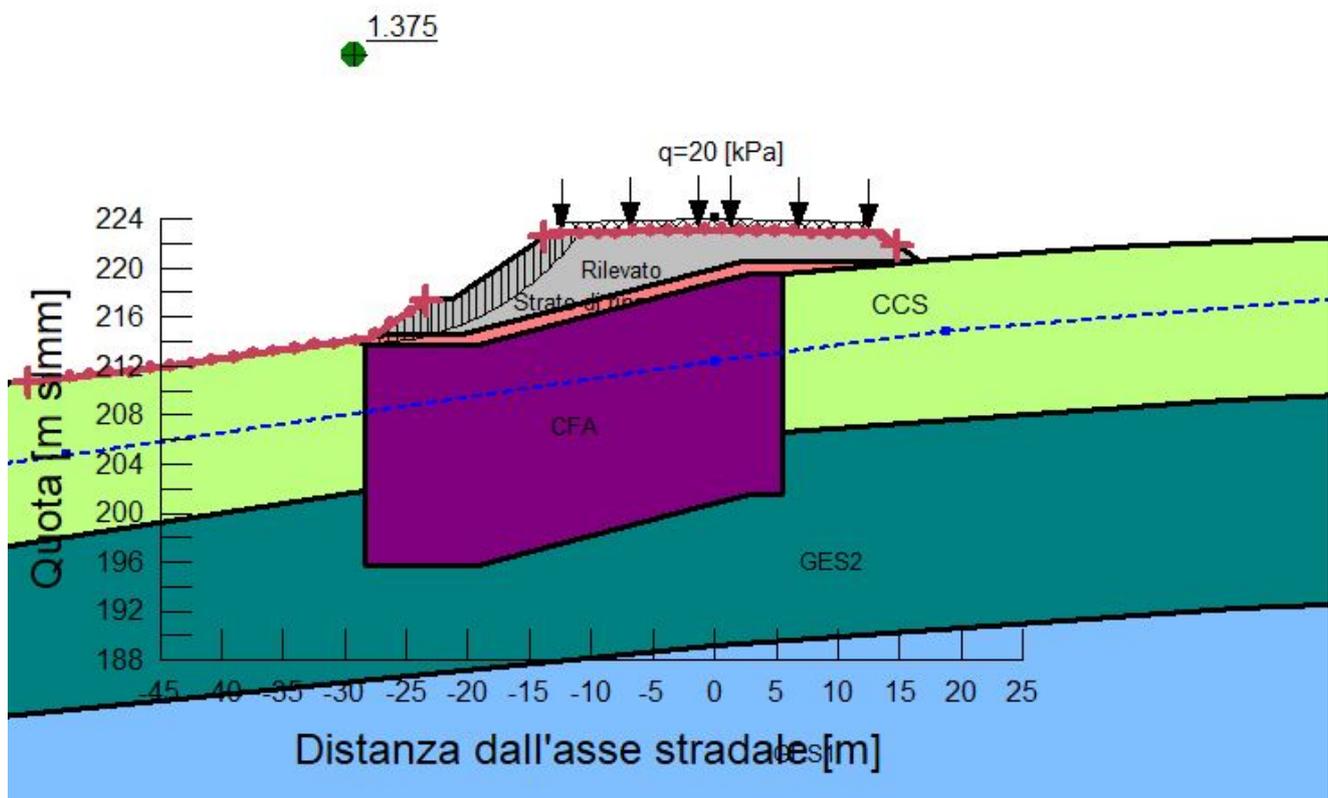


Figura 33: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 1+720 – Analisi di stabilità in condizioni statiche

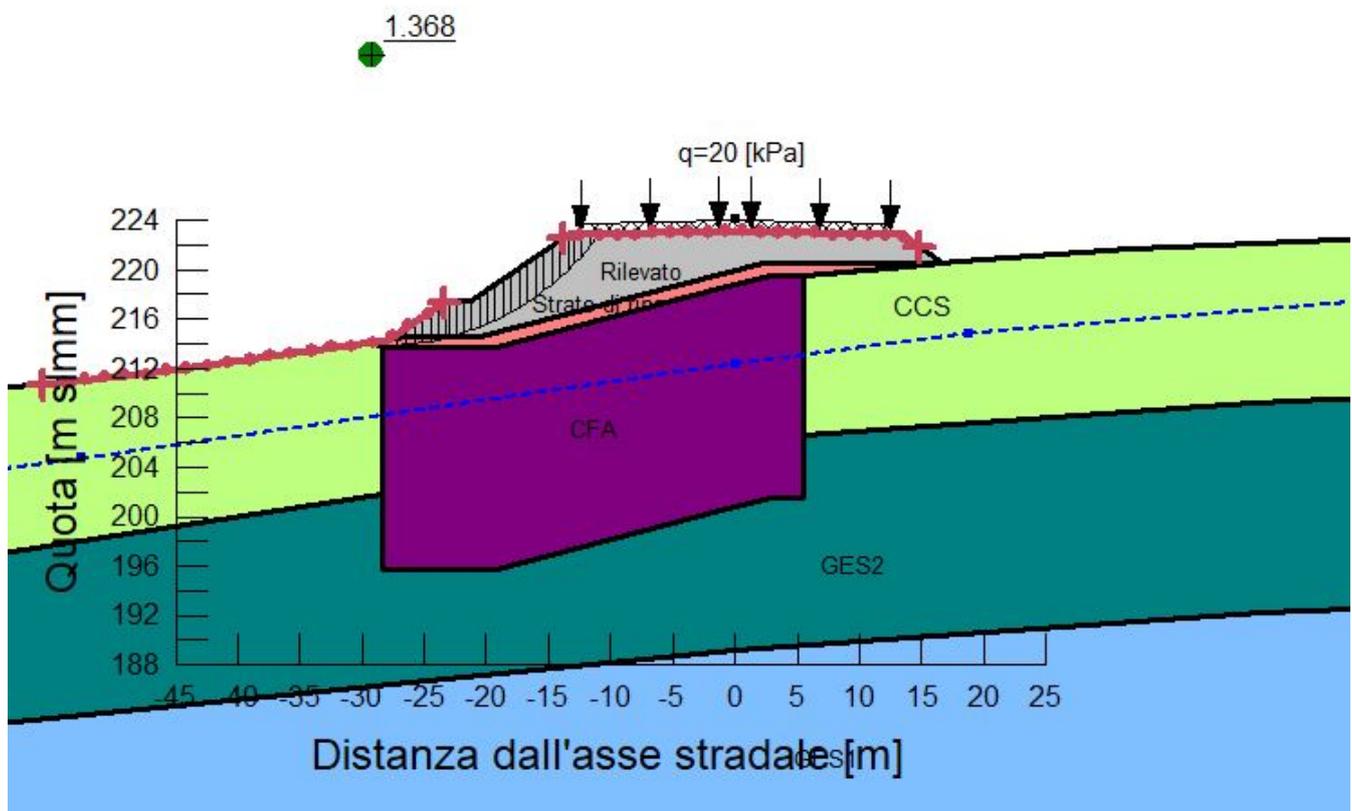
AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 1+720
Condizioni sismiche $k_h=0.044$; $k_v=0.022$

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 38 ° Piezometric Line: 1
 Name: CCS Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: CFA Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19.3 kN/m³ Cohesion: 240 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 10 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES1 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 21 kN/m³ Cohesion: 20 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: SAF Model: Undrained (Phi=0) Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 250 kPa Piezometric Line: 1
 Name: Strato di ripartizione Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 30.2 ° Piezometric Line: 1


 Figura 34: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 1+720 – Analisi di stabilità in condizioni sismiche ($k_v > 0$)

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 1+720
Condizioni sismiche $kh=0.044$; $k_v=-0.022$

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 38 ° Piezometric Line: 1
 Name: CCS Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: CFA Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19.3 kN/m³ Cohesion: 240 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 10 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES1 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 21 kN/m³ Cohesion: 20 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: SAF Model: Undrained (Phi=0) Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 250 kPa Piezometric Line: 1
 Name: Strato di ripartizione Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 30.2 ° Piezometric Line: 1


 Figura 35: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 1+720 – Analisi di stabilità sismica ($k_v < 0$)

10.3. VERIFICHE SLE

10.3.1. Introduzione e descrizione interventi

Per la stima dei cedimenti al disotto del rilevato, è stato implementato un modello 2D ad elementi finiti tramite il codice di calcolo PLAXIS descritto al paragrafo 6.2.2.

Le analisi sono finalizzate alla stima dei cedimenti attesi nel tempo e alla stima del cedimento residuo definito come la differenza tra il cedimento calcolato nella fase di “messa in esercizio” e i cedimenti attesi a lungo termine, considerando una durata significativa di 50 anni dopo la costruzione del rilevato.

La progettazione e il dimensionamento degli interventi hanno avuto come criterio quello di limitare il cedimento entro limiti accettabili, sia in termini di cedimento totale a lungo termine, che in termini di cedimento residuo dopo il termine dei lavori.

Per il caso particolare si prevedono interventi di miglioramento del terreno come descritto nell'introduzione al capitolo 10, che saranno costituiti dall'installazione di inclusioni rigide.

Per quanto riguarda l'analisi dei cedimenti in presenza di inclusioni rigide, la rigidità equivalente dello strato trattato è stata valutata mediante un ulteriore modello Plaxis assialsimmetrico, dove viene considerato quanto segue:

- Asse di simmetria coincidente con l'asse della singola colonna di trattamento;
- Raggio del modello pari a quello che restituisce un'area pari a quella di influenza di ciascuna colonna;
- Raggio della singola colonna pari a 0.3 m (nel modello viene rappresentata “mezza” colonna);
- Stratigrafia, falda e parametri geotecnici come dichiarati al precedente paragrafo 11.1;
- Strato di ripartizione di spessore 0.8 m a cui vengono assegnati gli stessi parametri geotecnici del bonifico;
- Carico corrispondente al peso del rilevato in asse;

La mesh di calcolo è rappresentata in Figura 36. Il modulo equivalente dello strato trattato viene valutato come rapporto tra il carico applicato e la deformazione (rapporto tra cedimento e altezza complessiva dello strato) dello strato compreso tra la testa e la base delle colonne al bordo del modello assialsimmetrico (quindi nel punto intermedio tra le colonne).

I risultati di tale valutazione sono riportati in Figura 37 in termini di contour dei cedimenti del modello e in Tabella 23 in termini di cedimento al bordo del modello nei due punti indicati sopra. Il modulo equivalente risulta quindi $E' = 128 / ((0.212 - 0.07) / 18) \approx 16000$ kPa.

Tabella 23: Sintesi della valutazione dei cedimenti per la stima del modulo equivalente dello strato trattato

Cedimento a testa strato trattato (base ripartitore)	Cedimento a base strato trattato	Spessore strato trattato
(m)	(m)	(m)
0.212	0.07	18

Output Version 2019.0.0.0

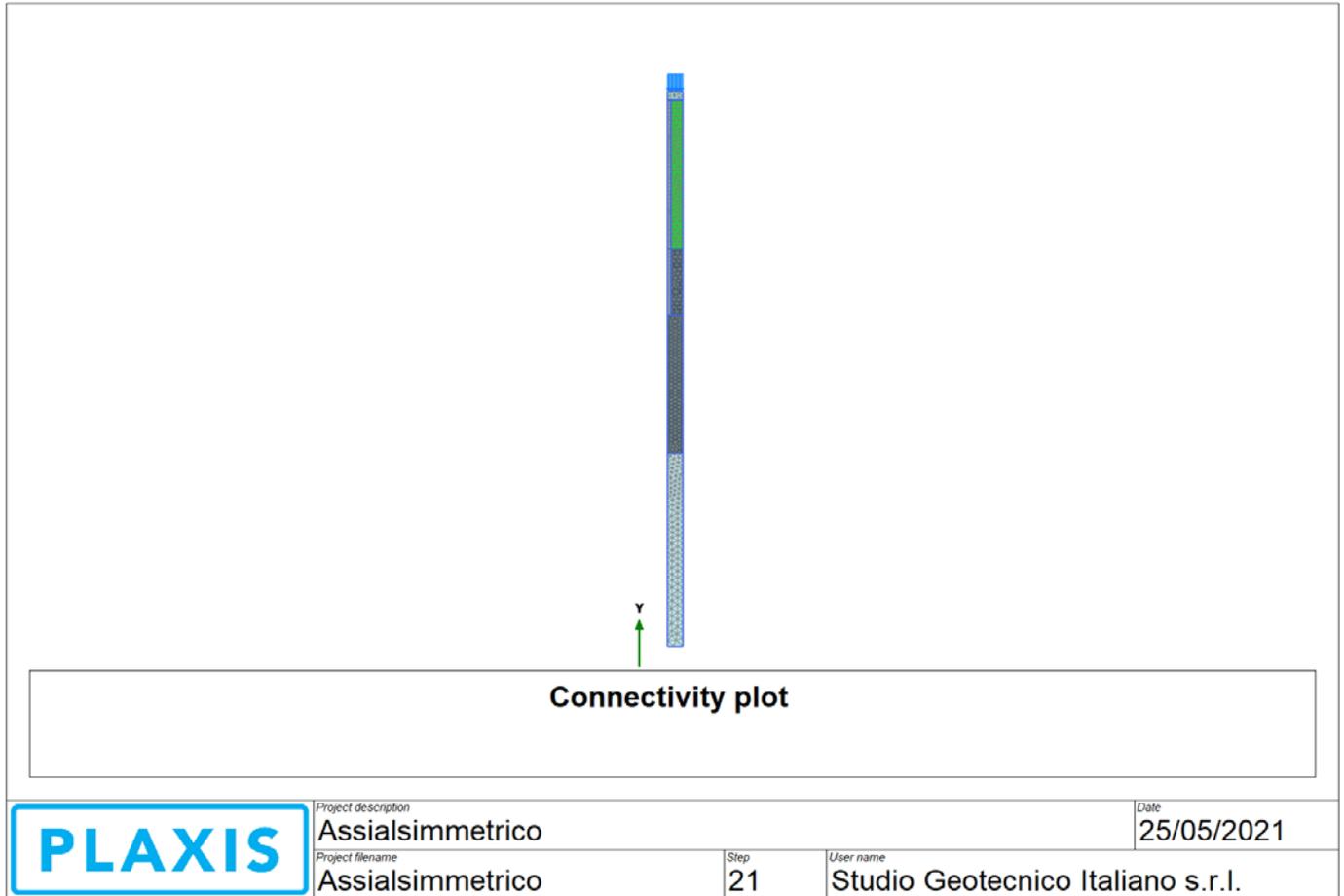


Figura 36 – Modello PLAXIS assialsimmetrico per la valutazione della rigidità equivalente dello strato trattato

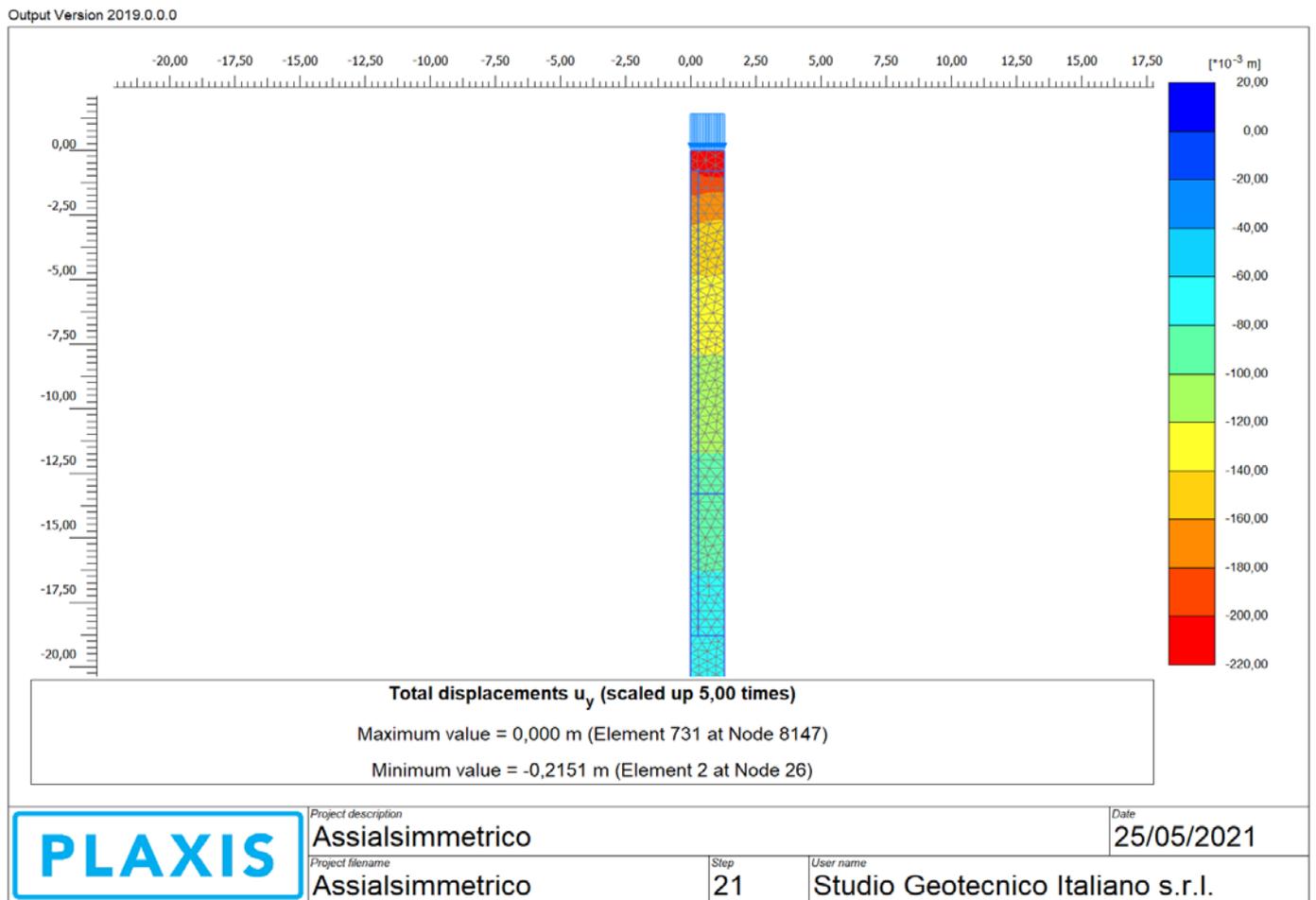


Figura 37 – Modello PLAXIS assialsimmetrico – contour dei cedimenti del modello soggetto al carico del rilevato

10.3.2. Mesh, stratigrafia e falda

La mesh e la stratigrafia per la sezione analizzata è mostrata di seguito in Figura 38. La stratigrafia è stata presa in sezione facendo riferimento a quanto riportato sul profilo geotecnico e sulle sezioni geotecniche. La falda è stata considerata a livelli “standard”, ovvero a quanto riportato sul profilo geotecnico; la falda è variabile tra circa 5 m e 8 m di profondità da piano campagna.

10.3.3. Modelli costitutivi e parametri geotecnici caratteristici

Per tutti gli strati di terreno naturale si è fatto riferimento ad un modello costitutivo “Soft-Soil”, dove la cedevolezza è governata dai coefficienti di compressibilità in primo carico, in scarico e ricarico e dal grado di sovraconsolidazione, con un modulo corrente quindi variabile in relazione allo stato tensionale corrente. I parametri geotecnici caratteristici utilizzati sono quelli dichiarati in Tabella 8. La permeabilità è stata presa pari a 10^{-8} m/s.

Per i materiali costituenti lo strato di ripartizione (caratterizzato per semplicità come il materiale di bonifica) e il rilevato si è invece fatto riferimento ad un modello costitutivo “Mohr-Coulomb”. I parametri

geotecnici caratteristici utilizzati sono quelli dichiarati in Tabella 7. La permeabilità è stata presa pari a 10^{-4} m/s.

Per lo strato di materiale trattato con inclusioni rigide si è fatto riferimento ad un modello costitutivo “Mohr-Coulomb” con modulo elastico come stimato al precedente paragrafo 10.3.1 e parametri di resistenza equivalenti come stimato al precedente paragrafo 10.2. La permeabilità è stata presa come quella del terreno naturale, quindi pari a 10^{-8} m/s.

10.3.4. Carichi

Nelle analisi effettuate per la valutazione dei cedimenti non sono stati considerati sovraccarichi di tipo variabile.

10.3.5. Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono quelle “standard” automaticamente impostate nel codice di calcolo, ovvero spostamenti orizzontali bloccati ai bordi verticali del modello e spostamenti verticali bloccati alla base del modello.

Le condizioni idrauliche al contorno sono quelle “standard” automaticamente impostate nel codice di calcolo, ovvero moto di filtrazione consentito ai bordi verticali ma impedita alla base del modello.

10.3.6. Fasi di calcolo

Le fasi di costruzione simulate nel calcolo sono le seguenti:

1. Generazione dello stato tensionale iniziale con piano campagna attuale;
2. Installazione inclusioni rigide;
3. Costruzione del rilevato sino all'altezza di progetto (durata 180 giorni)
4. Attesa 1 anno per la stima dei cedimenti a fine costruzione rilevato, prima della messa in esercizio dell'autostrada;
5. Attesa 50 anni per la stima dei cedimenti a lungo termine.

Le prime due fasi sono state effettuate senza considerare la consolidazione (a “lungo termine”), mentre per le successive la consolidazione è stata considerata assegnando dei tempi compatibili con quelli di costruzione di un rilevato autostradale. I cedimenti sono valutati nel seguito a partire dall'inizio della suddetta fase 3.

10.3.7. Risultati

I risultati delle analisi FEM per la stima dei cedimenti sono riportati nelle figure seguenti, in particolare:

- In Figura 39 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 4 di cui sopra;
- In Figura 40 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 5 di cui sopra;
- In Figura 41 si riporta l'andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3 di cui sopra) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso;
- In Figura 42 si riporta l'andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5 di cui sopra.

In Tabella 24 si riportano i cedimenti stimati per un punto in asse al rilevato, alla base dello stesso (derivati da Figura 42) alla fine della costruzione dell'opera (prima della messa in esercizio, fine della

fase 4 di cui sopra) e a “lungo termine” (fine della fase 5 di cui sopra). Nella stessa tabella si riporta il valore del cedimento residuo a “lungo termine” pari alla differenza fra i due precedenti.

Con riferimento ai risultati ottenuti sia in termini di valore assoluto (da inizio costruzione rilevato) che residuo dopo la messa in esercizio dell’opera, si ritiene che i valori di cedimento stimati siano compatibili con la funzionalità dell’opera. I cedimenti che si verificano all’interno del corpo del rilevato sono dell’ordine di meno di 1 cm (vedi Figura 41) e possono essere “recuperati” durante la costruzione del rilevato stesso.

Tabella 24: Sintesi sulla valutazione dei cedimenti

Sezione di calcolo	Cedimento a base rilevato, in asse rilevato prima della messa in esercizio (cm)	Cedimento a base rilevato, in asse rilevato a lungo termine (cm)	Cedimento residuo (cm)
RIL04 (km 1+720)	9.3	10.3	1

Output Version 2019.0.0.0

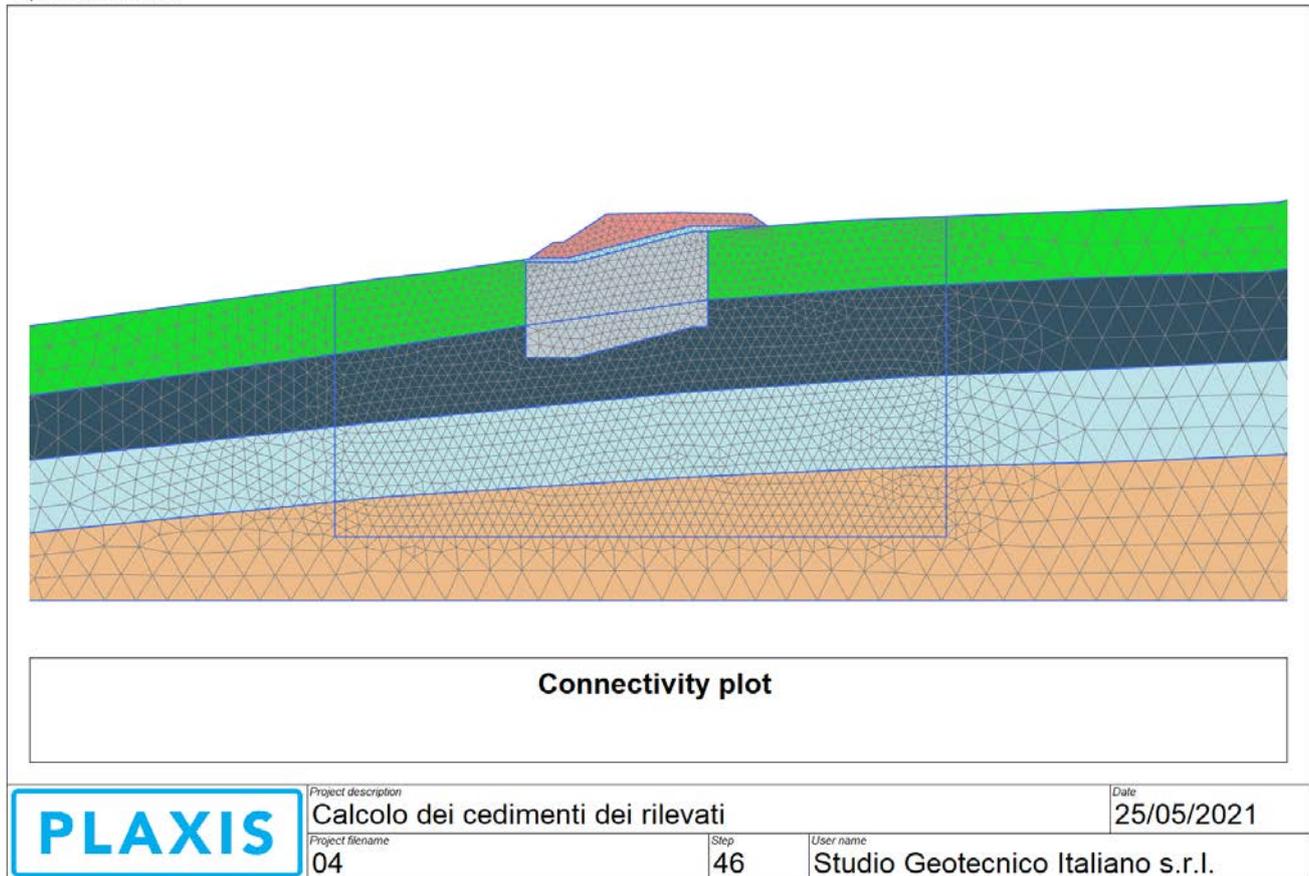


Figura 38 – Modello PLAXIS (con interventi) – Sezione km 1+720

Output Version 2019.0.0.0

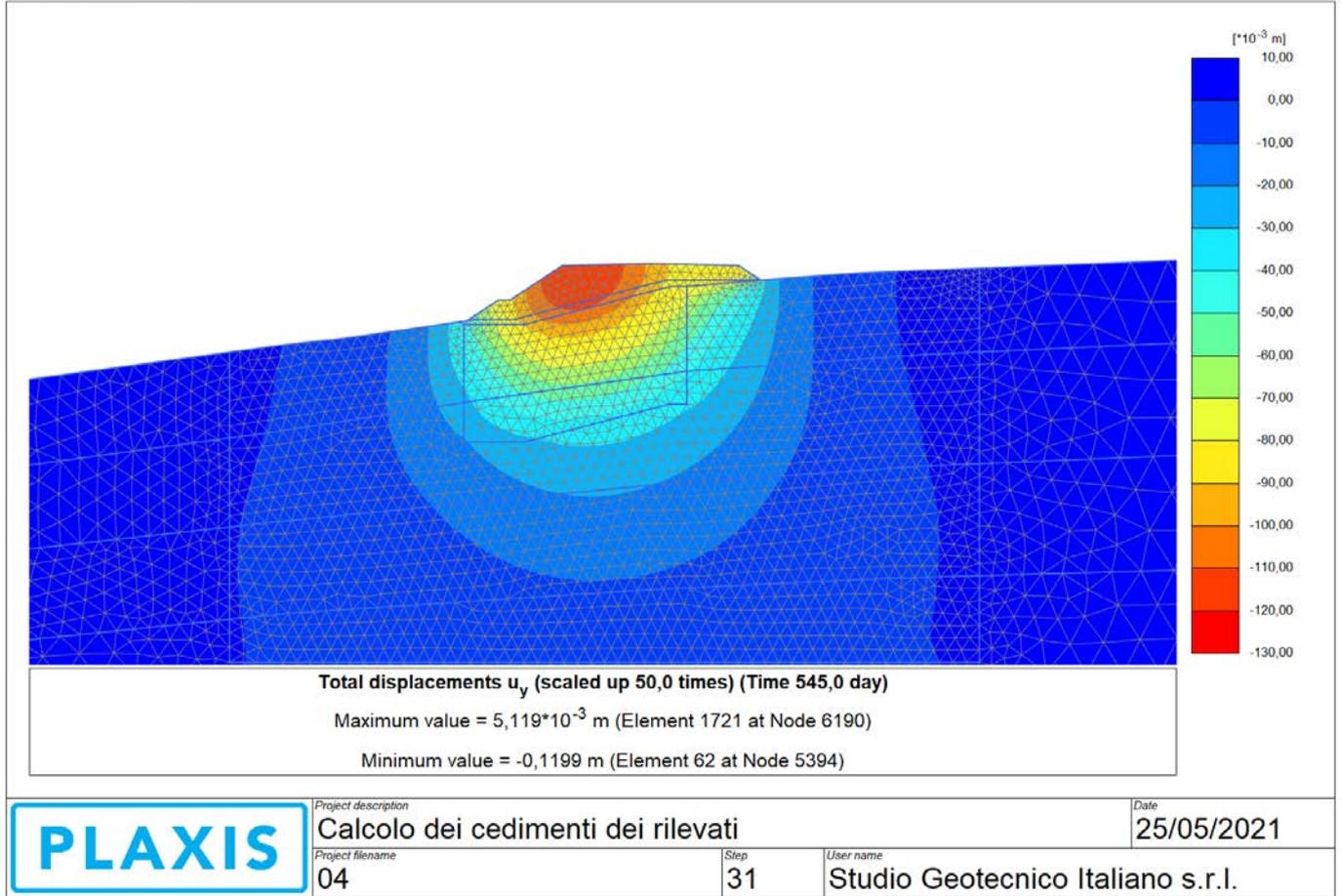


Figura 39: Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 1+720– cedimenti del modello a fine fase 4

Output Version 2019.0.0.0

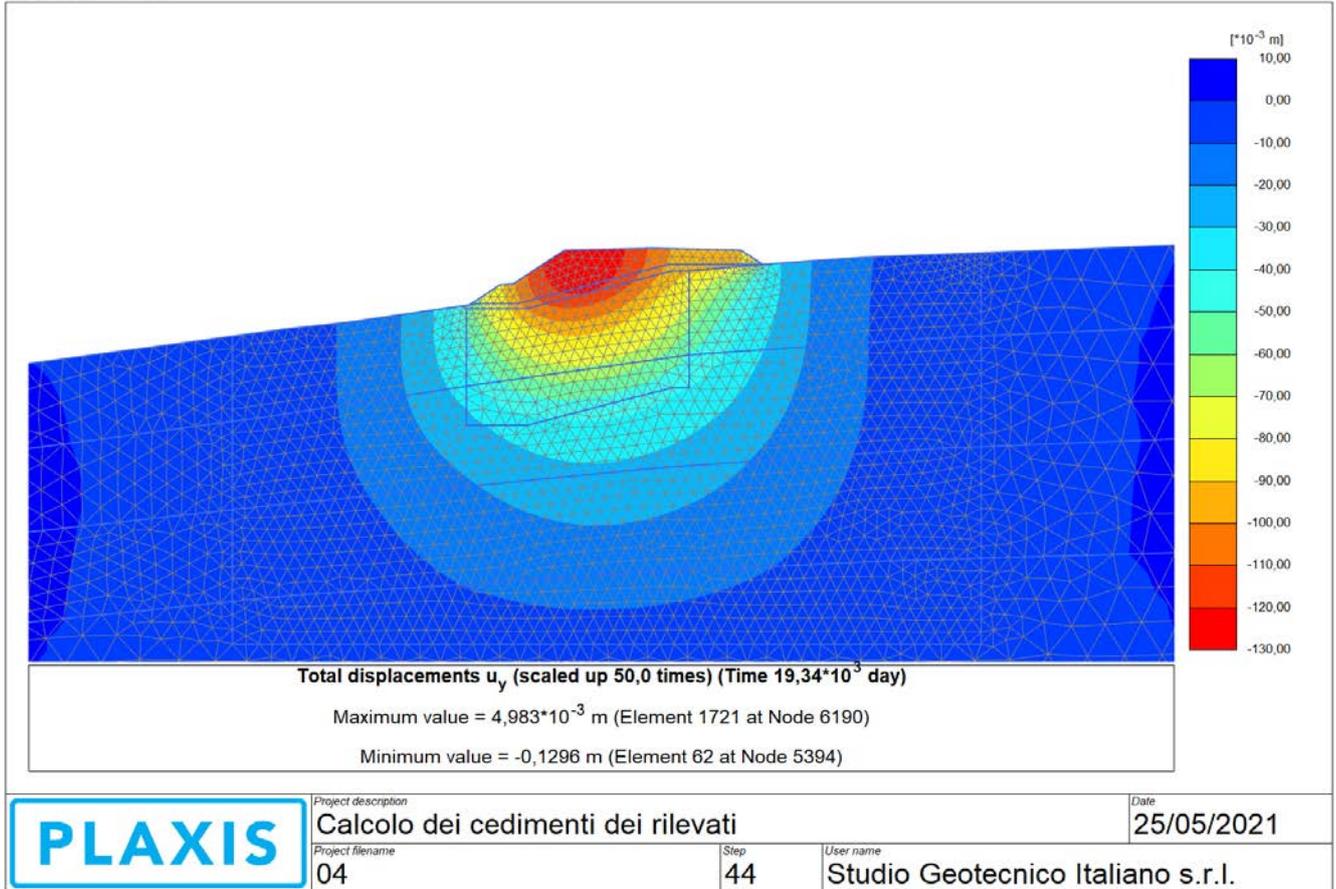


Figura 40 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 1+720 – cedimenti del modello a fine fase 5

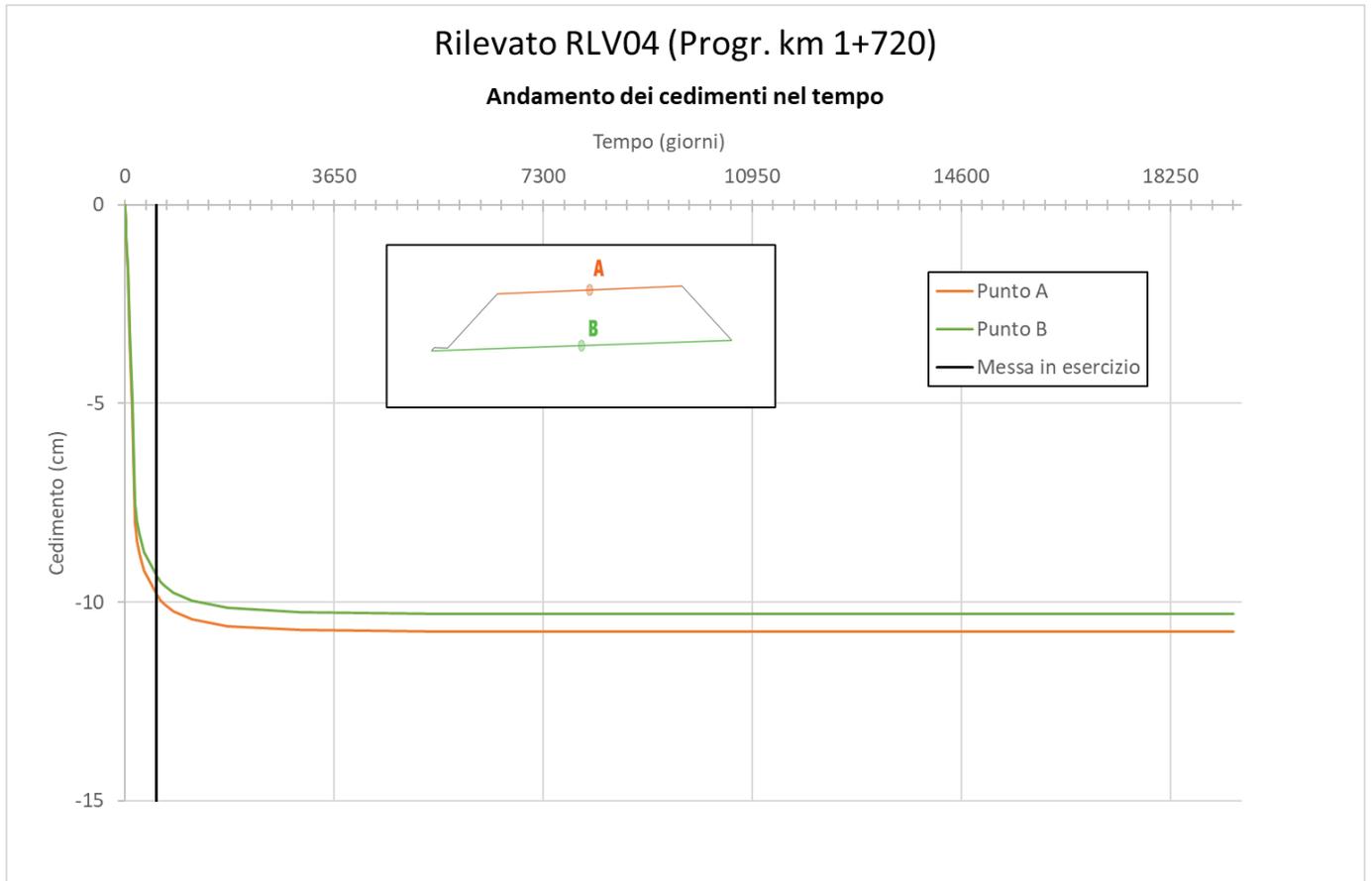


Figura 41 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 1+720 – andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso

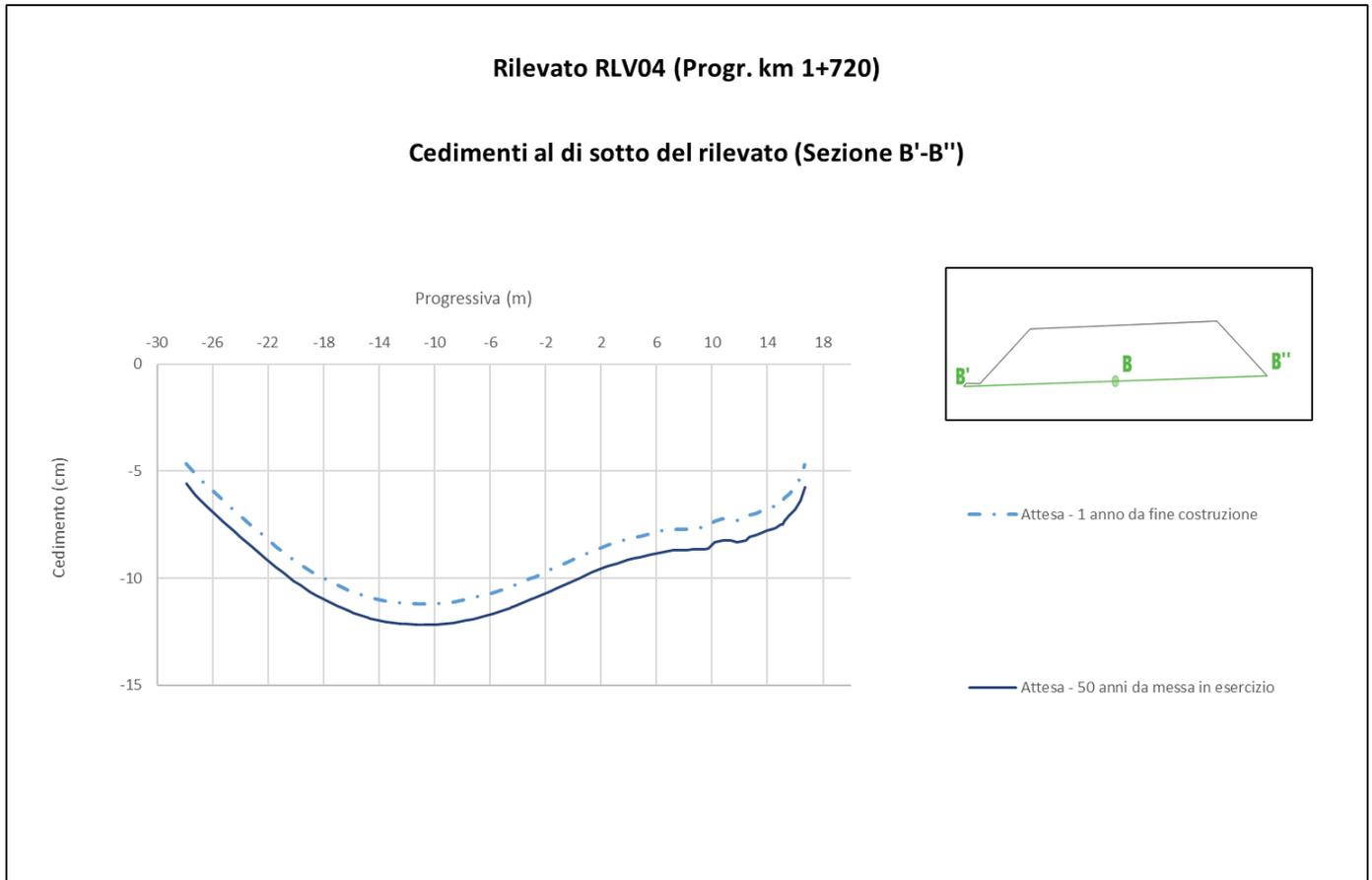


Figura 42 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 1+720 – andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5

11. RLV05

Oggetto di questo capitolo è il rilevato identificato con come “RLV05” relativo alla tratta autostradale compresa tra il km 1+977 e il km 2+156 (vedi Tabella 6).

In questa zona, sulla base di quanto indicato negli elaborati di geologia, è presente un deposito di frana quiescente su pendio piuttosto dolce. Il rilevato attraversa questo deposito al piede, quindi tenderà più che altro a stabilizzarlo. Tuttavia, date le presunte scarse qualità meccaniche di tale deposito di frana quiescente, si prevede di intervenire o con bonifica o con trattamento colonnare a seconda dell'altezza del rilevato.

A tal proposito, per geometrizzare correttamente i limiti dei vari interventi, sono state analizzate due sezioni; una che corrisponde al km 2+135 dove il rilevato è più alto, l'altra che corrisponde al km 2+095 (2+091.50, qui di seguito 2+095 per semplicità) dove il rilevato è sufficientemente basso da non richiedere più la berma intermedia (vedi Figura 43 e Figura 44).

L'intervento nella zona dove il rilevato presenta la berma intermedia consisterà nell'installazione di inclusioni rigide costituite da pali CFA non armati D600mm, L 10 m, a interasse 3.5 m su maglia quinconce. Tra la testa delle inclusioni e la base del rilevato sarà interposto uno strato di ripartizione in ghiaia ben compattata di spessore 0.8m.

L'intervento nella zona dove il rilevato è più basso (tale da non necessitare la berma intermedia) consisterà nella bonifica del materiale in sito con materiale granulare selezionato e compattato per uno spessore pari a 2.0 m.

Entrambi gli interventi si rendono necessari in funzione di garantire i requisiti minimi di normativa nei confronti della stabilità del rilevato.

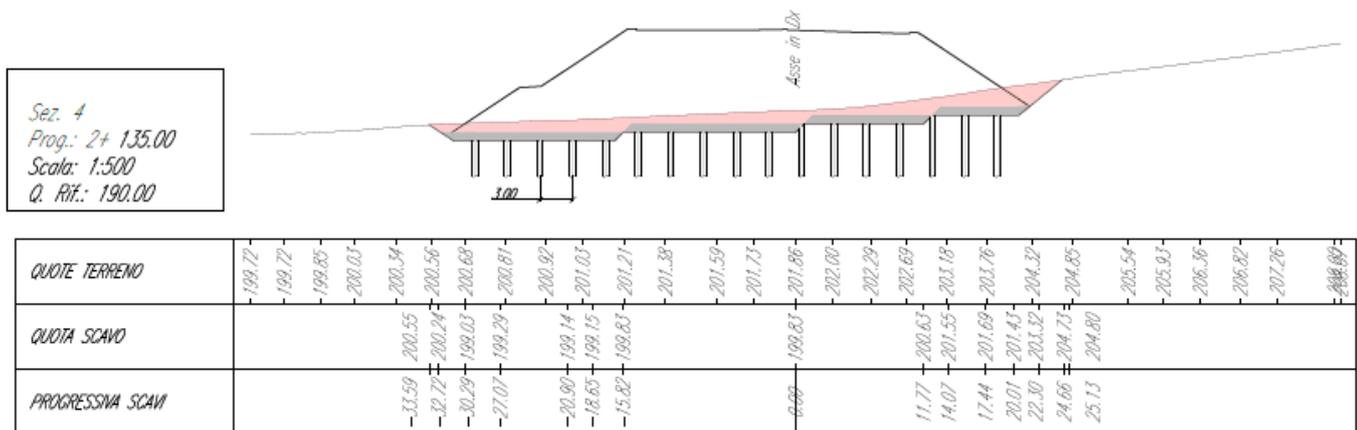


Figura 43: Sezione al km 2+135

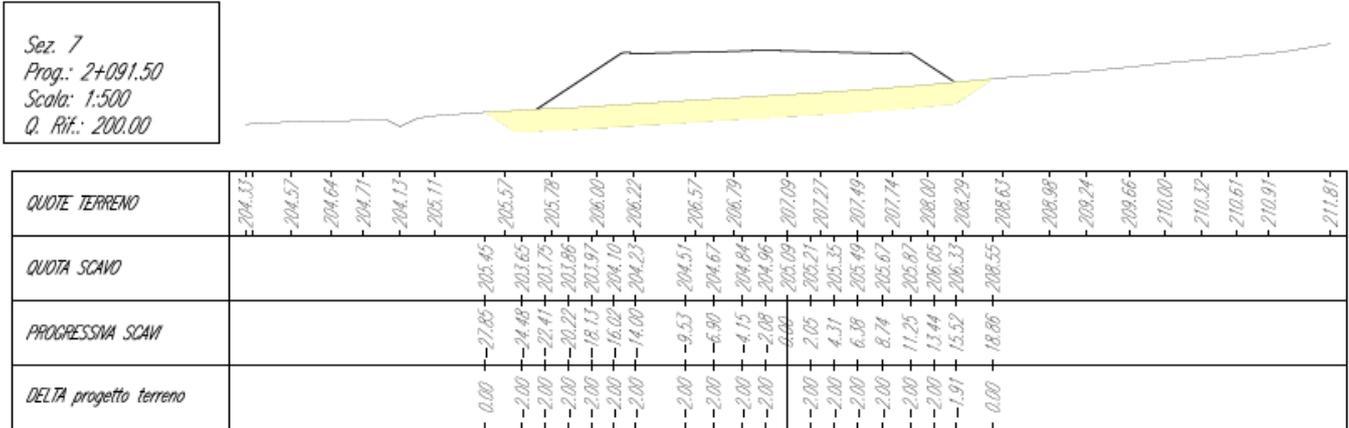


Figura 44: Sezione al km 2+095 (2+091.50)

11.1. STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

In Tabella 25 sono riportati i valori dei parametri geotecnici caratteristici del terreno naturale. Nella stessa tabella sono riportati anche gli spessori indicativi degli strati; in ogni caso per la stratigrafia lungo la sezione si è fatto riferimento al profilo geotecnico e alle sezioni geotecniche e geologiche.

Riguardo al materiale di frana quiescente indicato negli elaborati di geologia, i parametri di resistenza sono stati valutati tramite analisi di stabilità a ritroso ricercando un valore di FS pari a 1 a parametri caratteristici (considerando il deposito all'equilibrio), in condizioni di falda in superficie. Il risultato dell'analisi a ritroso è riportato in Figura 45.

Con riferimento ai materiali antropici (rilevato e bonifico) si rimanda alla Tabella 7.

La falda di progetto è stata assunta per le verifiche SLU in condizioni statiche come prossima al piano campagna (a circa 1 m di profondità). Tale assunzione è stata fatta sulla base del monitoraggio piezometrico in base al quale si hanno escursioni di falda anche di 8-10m, a dimostrazione del fatto che la bassa permeabilità dei materiali fa saturare rapidamente il terreno in corrispondenza degli eventi piovosi.

Per le verifiche SLU in condizioni sismiche la falda di progetto è invece stata assunta variabile tra 3.5 m e 6.5 m di profondità, come rappresentata sul profilo geotecnico.

Per le verifiche SLE (valutazione dei cedimenti), la falda di progetto è stata assunta sempre variabile tra 3.5 m e 6.5 m di profondità, come rappresentata sul profilo geotecnico.

Per maggiore dettaglio si rimanda alla relazione geotecnica di progetto (Doc. Rif. [9.]). Si segnala solamente che è stato inserito un ulteriore strato di coltri (stabili) nella porzione di monte della sezione a cui si assegnano gli stessi parametri dell'unità CCS.

Tabella 25: Parametri geotecnici di calcolo dei materiali in sito

Unità	Prof. da [m da p.c.]	Prof. a [m da p.c.]	γ kN/m ³	φ' °	c' kPa	c_u kPa	Cc [-]	Cr [-]	e_0 [-]	OCR [-]
Coltri F	0	2	19	16	0	-	0.05	0.04	0.65	1
Coltri/ CCS	2	14	19	21	0	80 - 120	0.05	0.04	0.65	3
GES2	14	37	19	21	10	150	0.18	0.034	0.6	2

**AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
 TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)**
Back analysis

Name: CCS	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: GES2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 10 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: Coltri	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: Coltri F	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 16 °	Piezometric Line: 1

1.004

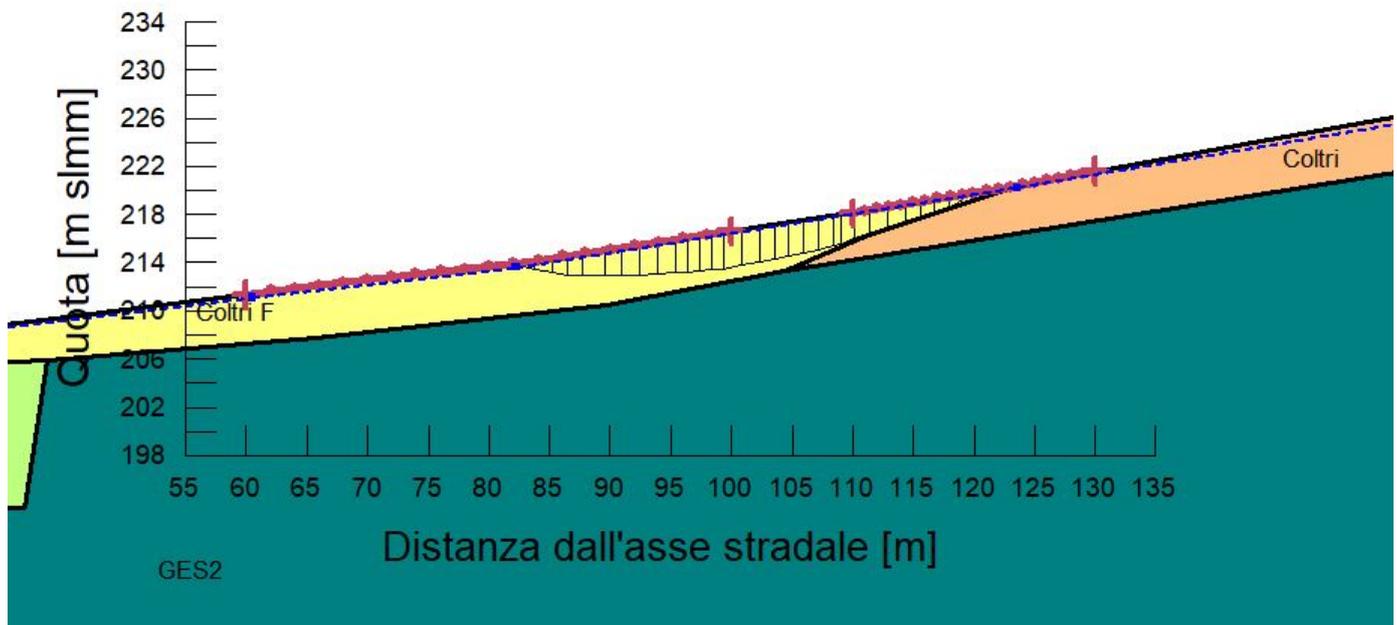


Figura 45: Analisi di stabilità a ritroso per la valutazione dei parametri di resistenza del deposito di frana quiescente

11.2. VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE

Per la verifica di stabilità globale del rilevato, è stato implementato un modello 2D tramite il codice di calcolo SLOPE/W descritto al paragrafo 6.2.1.

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.

Per completezza si riportano in Figura 46 e Figura 47 le analisi di stabilità del rilevato in assenza di interventi. Come si può notare i requisiti minimi di normativa in termini di stabilità del rilevato non sono garantiti. Nei successivi paragrafi si riportano le analisi di stabilità in presenza di interventi.

Per il terreno trattato con inclusioni rigide è stata stimata una resistenza equivalente stimata come segue:

- Classe calcestruzzo: C16/20;
- $f_{ck} = 16 \text{ MPa}$;
- $f_{cd} = 16/1.5 = 10.7 \text{ MPa}$;
- $\tau_{max} = 10.7 \cdot 0.85/2 = 4.55 \text{ MPa}$;
- $c_{eq} = \tau_{max} \cdot A_{incl} / A_{tot} = 4550 \cdot 0.28 / 5.3 = 240 \text{ kPa}$;

Dove

- A_{incl} = area della sezione dell'inclusione di diametro 0.6m;
- A_{tot} = area di influenza della singola inclusione con interasse 3.5 m a maglia quinconce.

Tale resistenza equivalente viene comunque fattorizzata nelle analisi di stabilità globale secondo il coefficiente $\gamma_M = 1.25$ da normativa, quindi:

- $c_{eq,k} = 240 \text{ kPa}$;
- $c_{eq,d} = 240/1.25 = 192 \text{ kPa}$;

A tale resistenza viene comunque associato l'angolo di attrito del materiale naturale che non viene influenzato dalla presenza delle colonne.

11.2.1. Verifiche SLU in condizioni statiche

In accordo a quanto dichiarato al paragrafo 3.1.1, le analisi sono state implementate in accordo all'Approccio 1 - Combinazione 2 e la verifica risulta soddisfatta per un fattore di sicurezza pari a $FS_{min}=1.1$.

In Tabella 26 si riportano il fattore di sicurezza calcolato e la figura di riferimento con indicazione del meccanismo critico associato ad esso; essendo $FS > 1.1$, **la verifica di stabilità globale in campo statico è soddisfatta.**

Tabella 26: Analisi di stabilità globale in campo statico

Sezione di calcolo	FS	Meccanismo di riferimento
RIL05 (km 2+135)	1.265	Figura 48
RIL05 (km 2+095)	1.145	Figura 49

11.2.2. Verifiche SLU in condizioni sismiche

In accordo a quanto dichiarato al paragrafo 3.2, le analisi sono state implementate considerando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici e la verifica risulta soddisfatta per un fattore di sicurezza pari a $FS_{\min}=1.2$.

In Tabella 27 si riportano il fattore di sicurezza calcolato e la figura di riferimento con indicazione del meccanismo critico associato ad esso; essendo $FS>1.2$, **la verifica di stabilità globale in campo pseudo statico è soddisfatta.**

Tabella 27: Analisi di stabilità globale in campo statico

Sezione di calcolo	FS	Meccanismo di riferimento
RIL05 (km 2+135)	1.445 (kv>0)	Figura 50 (kv>0)
	1.438 (kv<0)	Figura 51 (kv<0)
RIL05 (km 2+095)	1.465 (kv>0)	Figura 52 (kv>0)
	1.455 (kv<0)	Figura 53 (kv<0)

**AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
 TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)**
**Analisi di stabilità rilevati
 Sez. 2+135**
Condizioni statiche

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 32 ° Piezometric Line: 1
 Name: CCS Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 8 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: Strato di ripartizione Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 30.2 ° Piezometric Line: 1
 Name: Coltri Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: Coltri F Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 12.9 ° Piezometric Line: 1

1.002

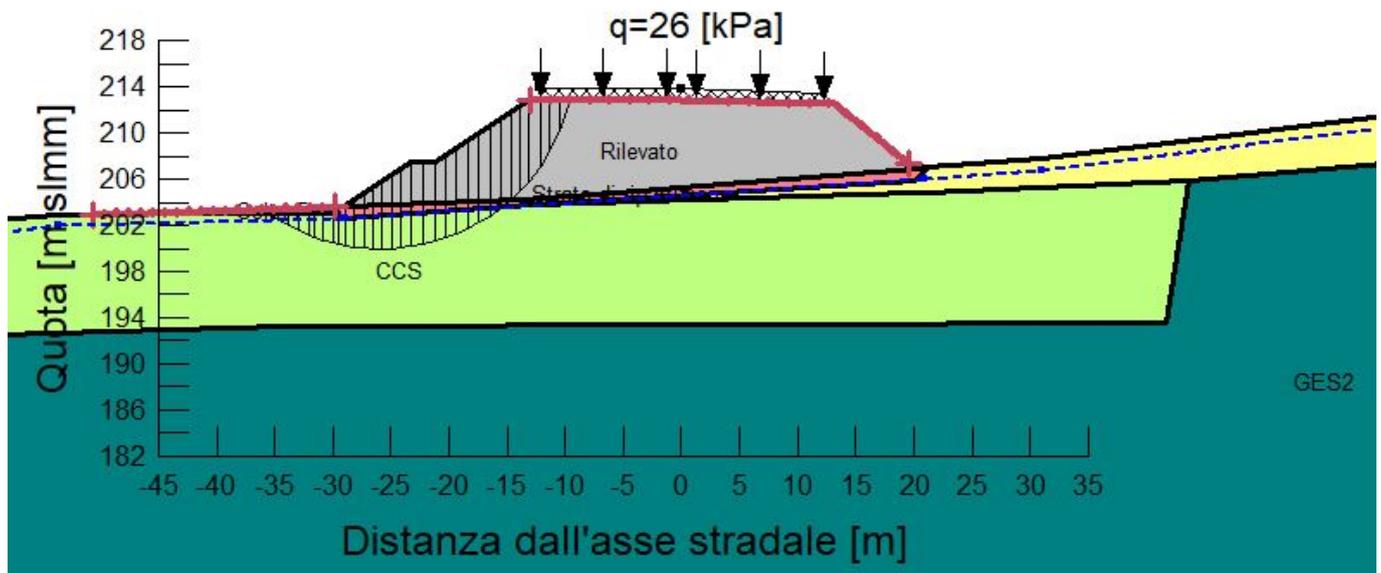


Figura 46: Modello SLOPE (senza interventi) – Sezione km 2+135 – Analisi di stabilità in condizioni statiche

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 2+095
Statica

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 32 °	Piezometric Line: 1
Name: CCS	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: GES2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 8 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: Coltri	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: Coltri F	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 12.9 °	Piezometric Line: 1

0.809

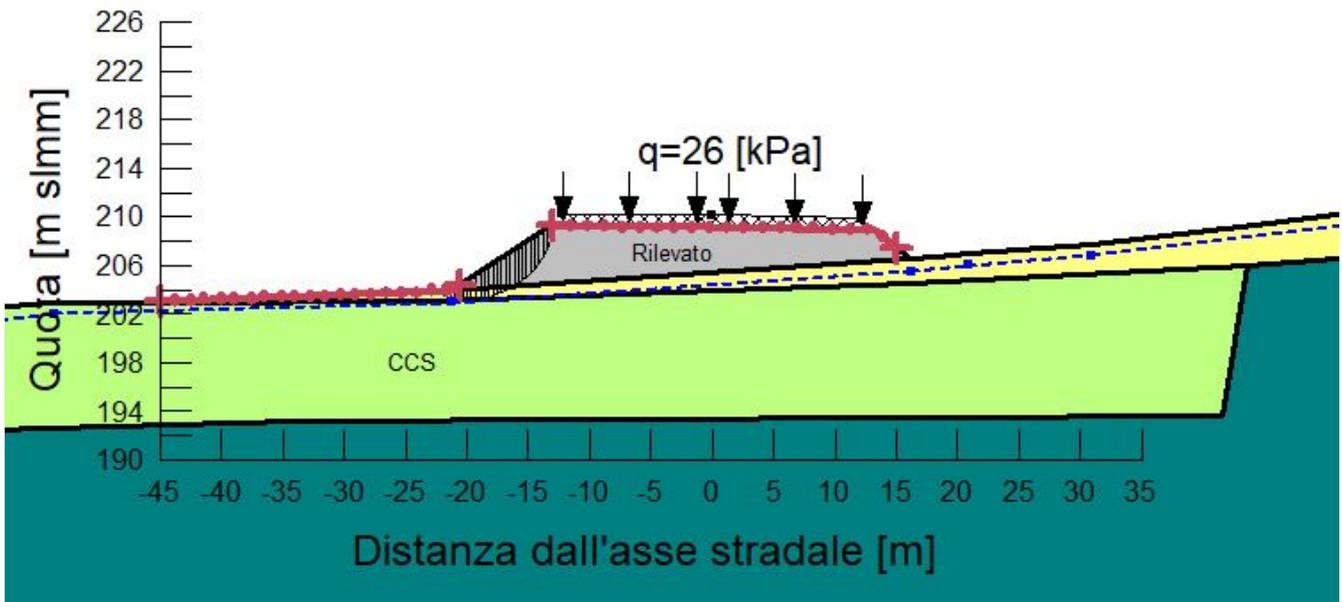


Figura 47: Modello SLOPE (senza interventi) – Sezione km 2+095 – Analisi di stabilità in condizioni statiche

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 2+135
Condizioni statiche

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 32 ° Piezometric Line: 1
 Name: CCS Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: CFA Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19.3 kN/m³ Cohesion: 191 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 8 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: Strato di ripartizione Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 30.2 ° Piezometric Line: 1
 Name: Coltri Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: Coltri F Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 12.9 ° Piezometric Line: 1

1.265

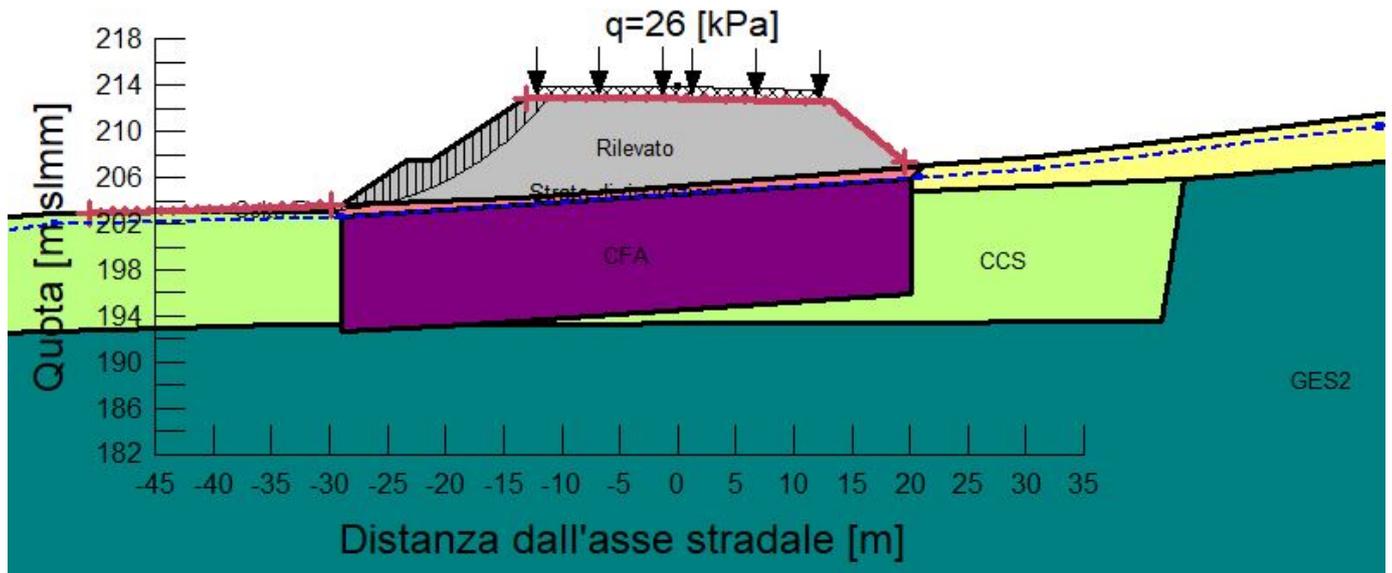


Figura 48: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 2+135 – Analisi di stabilità in condizioni statiche

**AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
 TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)**
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 2+095
Condizioni statiche

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 32 °	Piezometric Line: 1
Name: CCS	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: GES2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 8 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: Bonifico	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 30.2 °	Piezometric Line: 1
Name: Coltri	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: Coltri F	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 12.9 °	Piezometric Line: 1

1.145

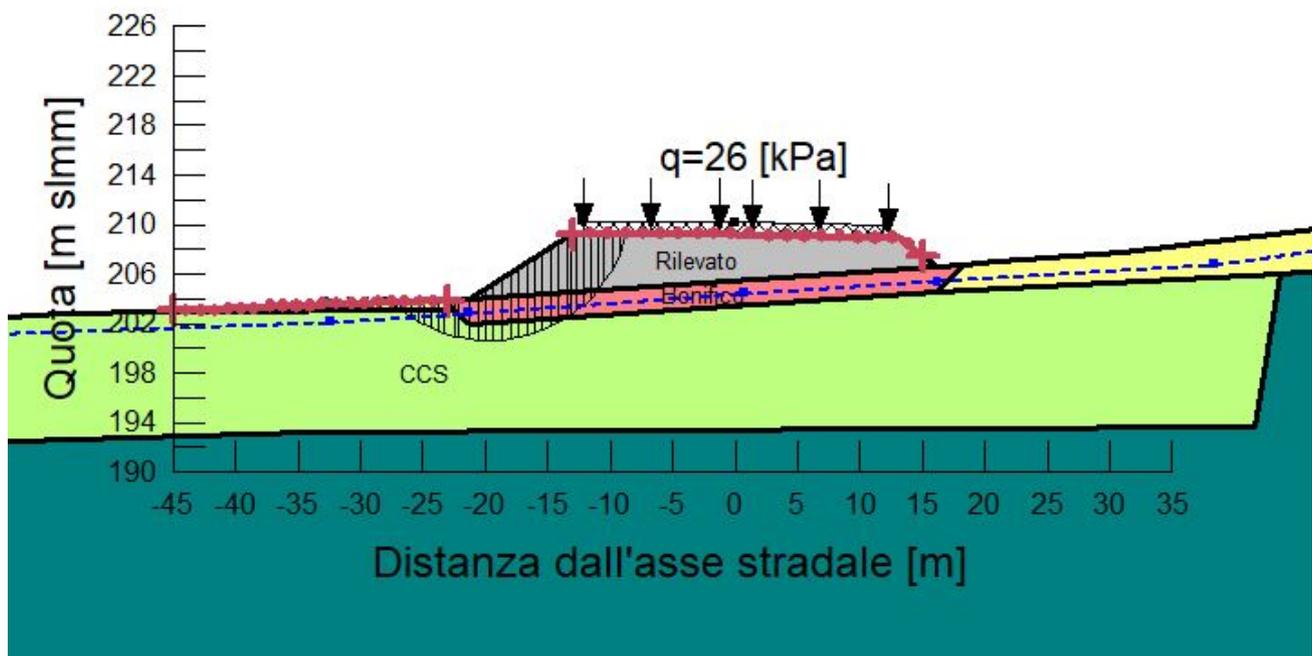


Figura 49: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 2+095 – Analisi di stabilità in condizioni statiche

**AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
 TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)**
**Analisi di stabilità rilevati
 Sez. 2+135**
Condizioni sismiche $k_h=0.044$ $k_v=+0.022$

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 38 ° Piezometric Line: 1
 Name: CCS Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: CFA Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19.3 kN/m³ Cohesion: 240 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 10 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: Strato di ripartizione Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 36 ° Piezometric Line: 1
 Name: Coltri Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: Coltri F Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 16 ° Piezometric Line: 1

1.445

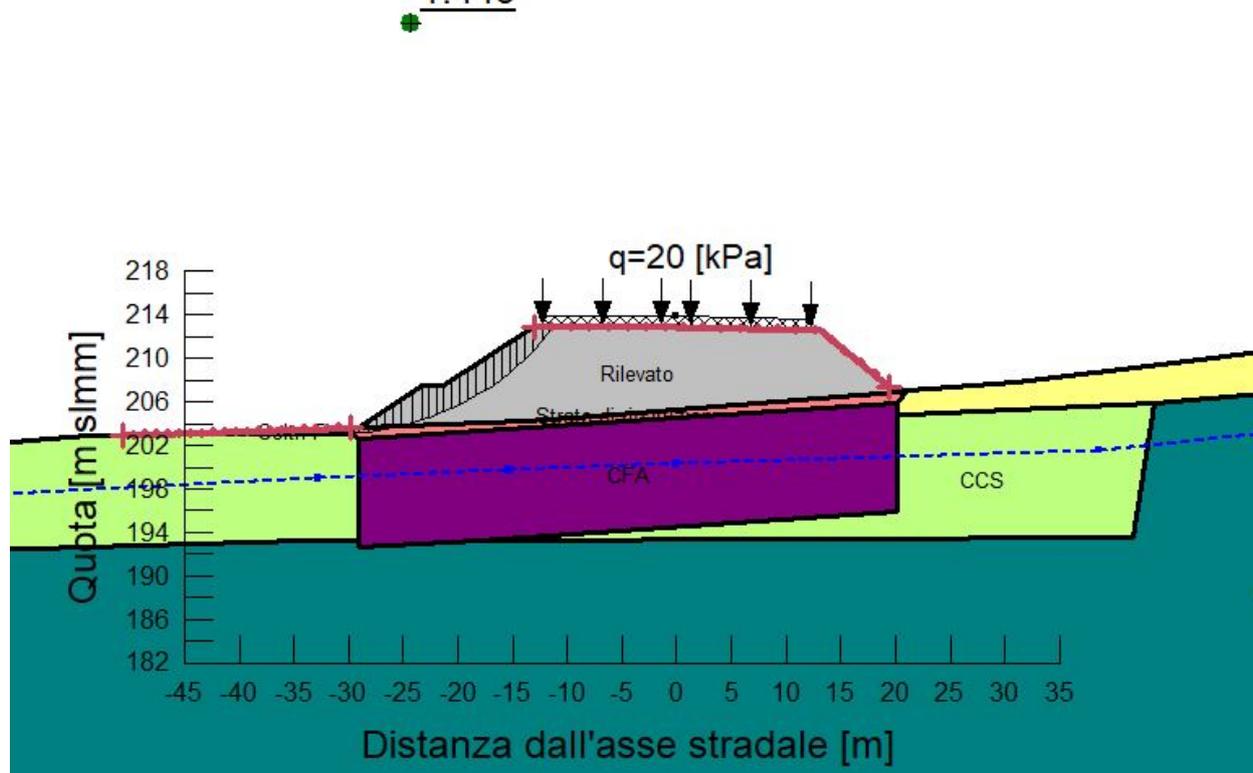


Figura 50: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 2+135 – Analisi di stabilità in condizioni sismiche ($k_v > 0$)

**AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
 TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)**
**Analisi di stabilità rilevati
 Sez. 2+135**
Condizioni sismiche $kh=0.044$ $kv=-0.022$

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 38 ° Piezometric Line: 1
 Name: CCS Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: CFA Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19.3 kN/m³ Cohesion: 240 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 10 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: Strato di ripartizione Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 36 ° Piezometric Line: 1
 Name: Coltri Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: Coltri F Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 16 ° Piezometric Line: 1

1.438

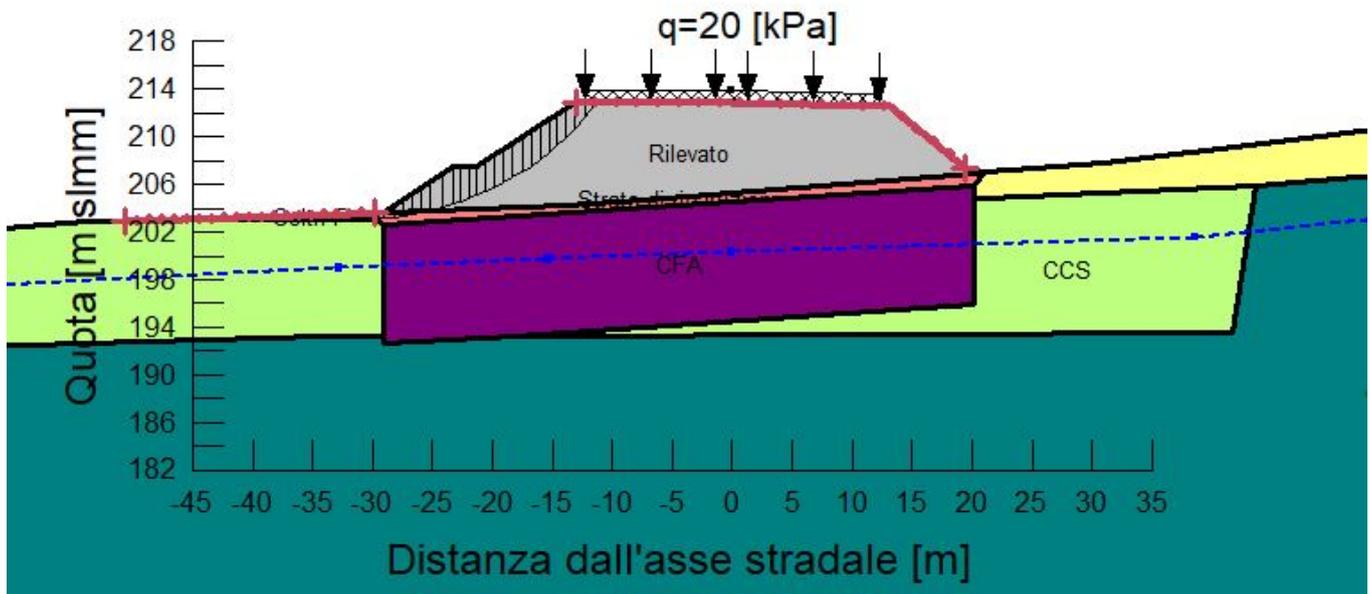
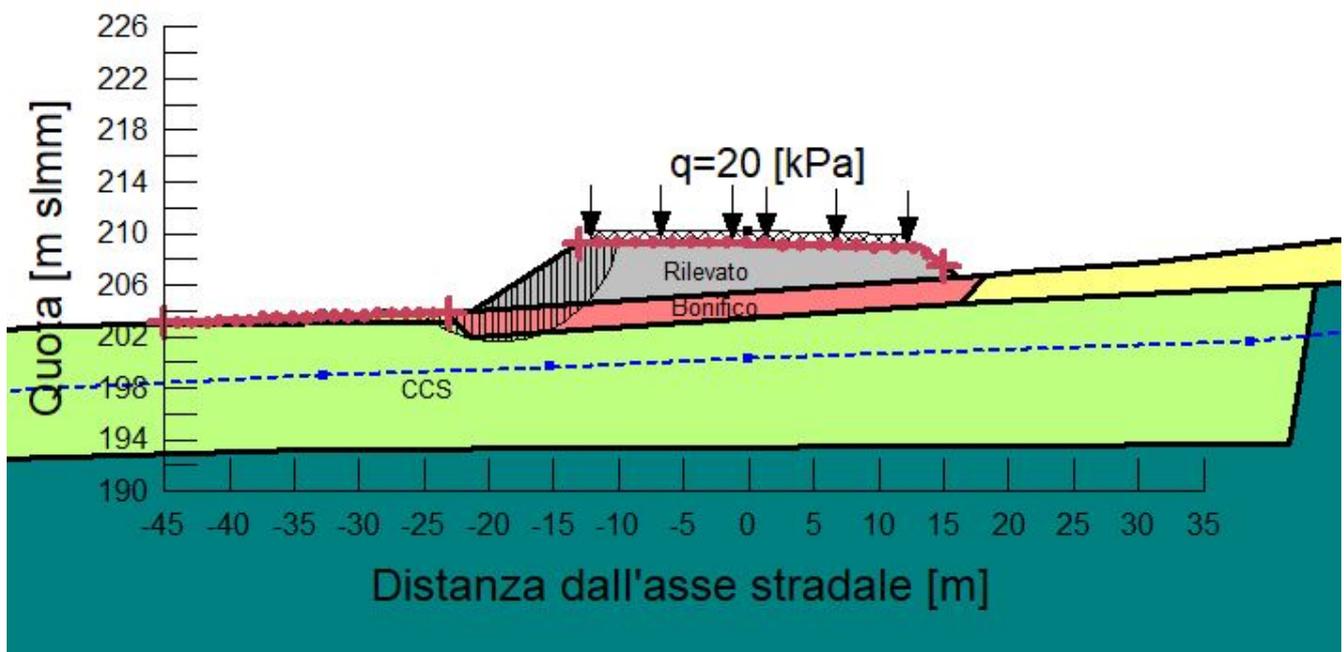


Figura 51: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 2+135 – Analisi di stabilità sismica ($kv < 0$)

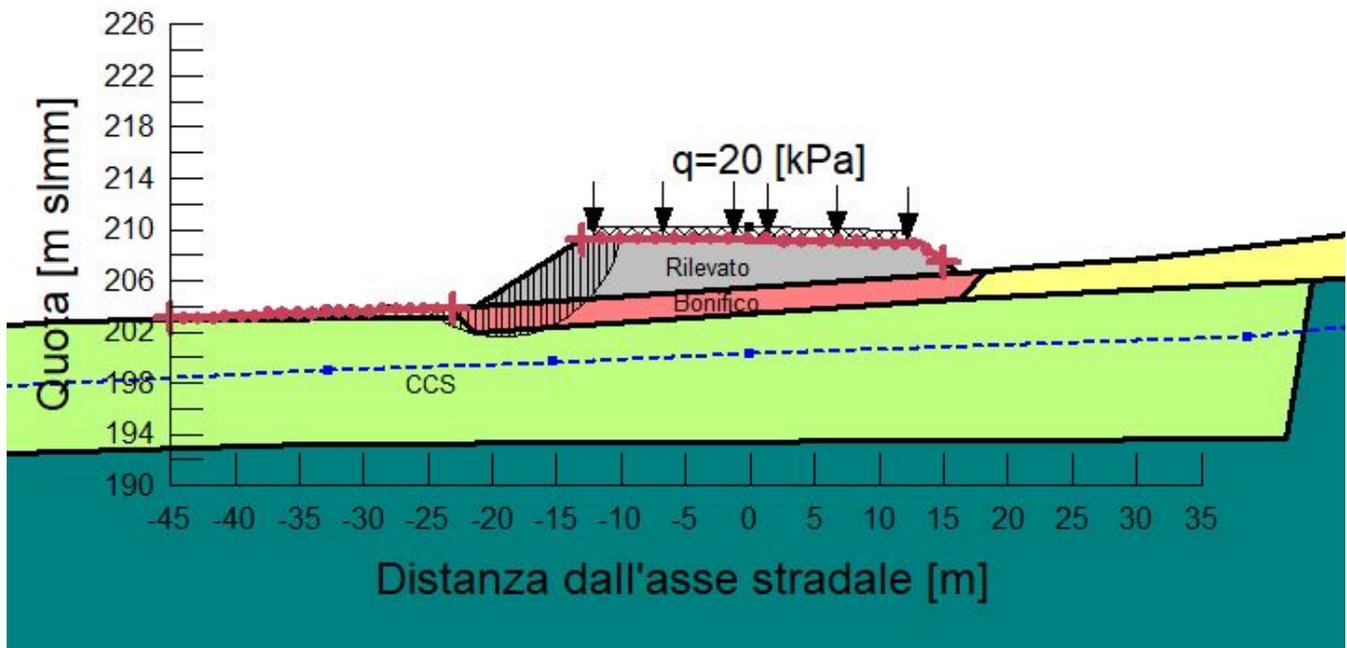
AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 2+095
Condizioni sismiche $k_h=0.044$ $k_v=0.022$

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 38 °	Piezometric Line: 1
Name: CCS	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: GES2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 10 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: Bonifico	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 36 °	Piezometric Line: 1
Name: Coltri	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: Coltri F	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 16 °	Piezometric Line: 1

1.465

 Figura 52: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 2+095 – Analisi di stabilità in condizioni sismiche ($k_v > 0$)

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 2+095
Condizioni sismiche $k_h=0.044$ $k_v=-0.022$

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 38 ° Piezometric Line: 1
 Name: CCS Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: GES2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 10 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: Bonifico Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 36 ° Piezometric Line: 1
 Name: Coltri Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: Coltri F Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 16 ° Piezometric Line: 1

1.455

 Figura 53: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 2+095 – Analisi di stabilità sismica ($k_v < 0$)

11.3. VERIFICHE SLE

11.3.1. Introduzione e descrizione interventi

Per la stima dei cedimenti al di sotto del rilevato, è stato implementato un modello 2D ad elementi finiti tramite il codice di calcolo PLAXIS descritto al paragrafo 6.2.2.

Le analisi sono finalizzate alla stima dei cedimenti attesi nel tempo e alla stima del cedimento residuo definito come la differenza tra il cedimento calcolato nella fase di “messa in esercizio” e i cedimenti attesi a lungo termine, considerando una durata significativa di 50 anni dopo la costruzione del rilevato.

La progettazione e il dimensionamento degli interventi hanno avuto come criterio quello di limitare il cedimento entro limiti accettabili, sia in termini di cedimento totale a lungo termine, che in termini di cedimento residuo dopo il termine dei lavori.

Per il caso particolare si prevedono interventi di miglioramento del terreno come descritto nell'introduzione al capitolo 11, che possono essere costituiti da inclusioni rigide oppure semplice bonifica in relazione all'altezza del rilevato.

Per quanto riguarda l'analisi dei cedimenti in presenza di inclusioni rigide, la rigidità equivalente dello strato trattato è stata valutata mediante un ulteriore modello Plaxis assialsimmetrico, dove viene considerato quanto segue:

- Asse di simmetria coincidente con l'asse della singola colonna di trattamento;
- Raggio del modello pari a quello che restituisce un'area pari a quella di influenza di ciascuna colonna;
- Raggio della singola colonna pari a 0.3 m (nel modello viene rappresentata “mezza” colonna);
- Stratigrafia, falda e parametri geotecnici come dichiarati al precedente paragrafo 11.1;
- Strato di ripartizione di spessore 0.8 m a cui vengono assegnati gli stessi parametri geotecnici del bonifico;
- Carico corrispondente al peso del rilevato in asse;

La mesh di calcolo è rappresentata in Figura 54. Il modulo equivalente dello strato trattato viene preso valutato come rapporto tra il carico applicato e la deformazione (rapporto tra cedimento e altezza complessiva dello strato) dello strato compreso tra la testa e la base delle colonne al bordo del modello assialsimmetrico (quindi nel punto intermedio tra le colonne).

I risultati di tale valutazione sono riportati in Figura 55 in termini di contour dei cedimenti del modello e in Tabella 28 in termini di cedimento al bordo del modello nei due punti indicati sopra. Il modulo equivalente risulta quindi $E' = 171 / ((0.269 - 12.1) / 10) \approx 11500$ kPa.

Tabella 28: Sintesi della valutazione dei cedimenti per la stima del modulo equivalente dello strato trattato

Cedimento a testa strato trattato (base ripartitore)	Cedimento a base strato trattato	Spessore strato trattato
(m)	(m)	(m)
0.269	0.121	10

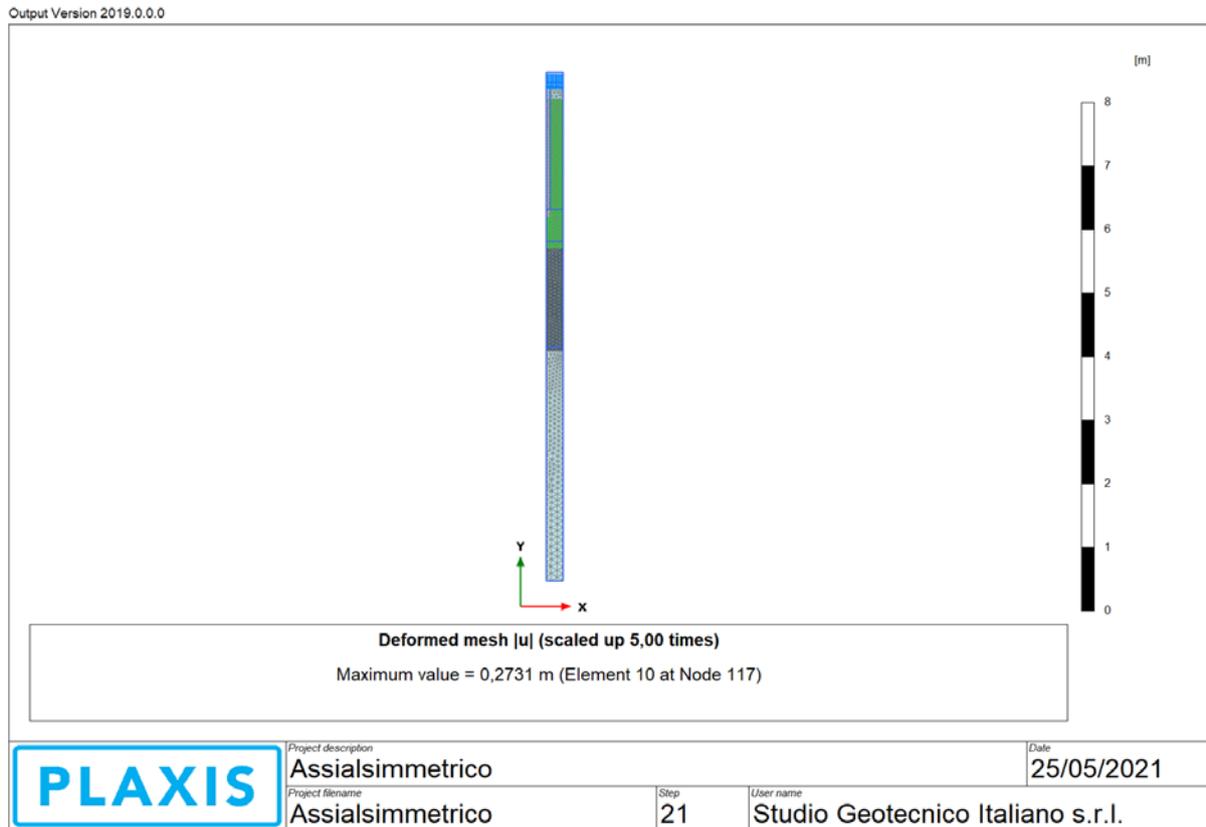


Figura 54 – Modello PLAXIS assialsimmetrico per la valutazione della rigidità equivalente dello strato trattato

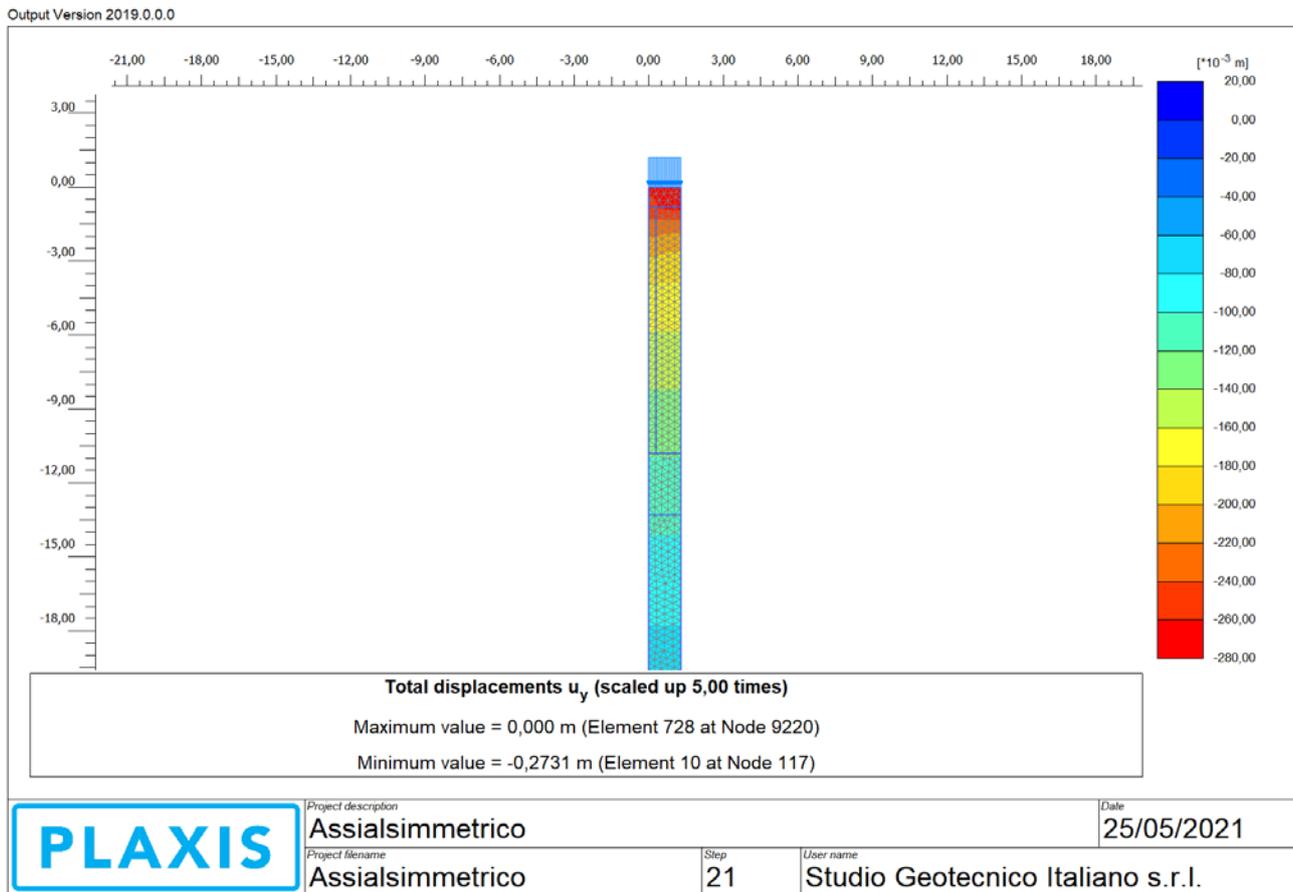


Figura 55 – Modello PLAXIS assialsimmetrico – contour dei cedimenti del modello soggetto al carico del rilevato

11.3.2. Mesh, stratigrafia e falda

La mesh e la stratigrafia per le due sezioni analizzate sono mostrate di seguito in Figura 56 e Figura 57. La stratigrafia è stata presa in sezione facendo riferimento a quanto riportato sul profilo geotecnico e sulle sezioni geotecniche. La falda è stata considerata a livelli “standard”, ovvero a quanto riportato sul profilo geotecnico; la falda è variabile tra 3.5 m e 6.5 m di profondità da piano campagna.

11.3.3. Modelli costitutivi e parametri geotecnici caratteristici

Per tutti gli strati di terreno naturale si è fatto riferimento ad un modello costitutivo “Soft-Soil”, dove la cedevolezza è governata dai coefficienti di compressibilità in primo carico, in scarico e ricarico e dal grado di sovraconsolidazione, con un modulo corrente quindi variabile in relazione allo stato tensionale corrente. I parametri geotecnici caratteristici utilizzati sono quelli dichiarati in Tabella 8. La permeabilità è stata presa pari a 10^{-8} m/s.

Per i materiali costituenti la bonifica, il ripartitore (caratterizzato per semplicità come il materiale di bonifica) e il rilevato si è invece fatto riferimento ad un modello costitutivo “Mohr-Coulomb”. I parametri geotecnici caratteristici utilizzati sono quelli dichiarati in Tabella 7. La permeabilità è stata presa pari a 10^{-4} m/s.

Per lo strato di materiale trattato con inclusioni rigide si è fatto riferimento ad un modello costitutivo “Mohr-Coulomb” con modulo elastico come stimato al precedente paragrafo 11.3.1 e parametri di resistenza equivalenti come stimato al precedente paragrafo 11.2. La permeabilità è stata presa come quella del terreno naturale, quindi pari a 10^{-8} m/s.

11.3.4. Carichi

Nelle analisi effettuate per la valutazione dei cedimenti non sono stati considerati sovraccarichi di tipo variabile.

11.3.5. Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono quelle “standard” automaticamente impostate nel codice di calcolo, ovvero spostamenti orizzontali bloccati ai bordi verticali del modello e spostamenti verticali bloccati alla base del modello.

Le condizioni idrauliche al contorno sono quelle “standard” automaticamente impostate nel codice di calcolo, ovvero moto di filtrazione consentito ai bordi verticali ma impedita alla base del modello.

11.3.6. Fasi di calcolo

Le fasi di costruzione simulate nel calcolo sono le seguenti:

1. Generazione dello stato tensionale iniziale con piano campagna attuale;
2. Scavo e sostituzione fino a 2 m di profondità per bonifica oppure installazione inclusioni rigide;
3. Costruzione del rilevato sino all'altezza di progetto (durata 180 giorni)
4. Attesa 1 anno per la stima dei cedimenti a fine costruzione rilevato, prima della messa in esercizio dell'autostrada;
5. Attesa 50 anni per la stima dei cedimenti a lungo termine.

Le prime due fasi sono state effettuate senza considerare la consolidazione (a “lungo termine”), mentre per le successive la consolidazione è stata considerata assegnando dei tempi compatibili con quelli di costruzione di un rilevato autostradale. I cedimenti sono valutati nel seguito a partire dall'inizio della suddetta fase 3.

11.3.7. Risultati

I risultati delle analisi FEM per la stima dei cedimenti sono riportati nelle figure seguenti, in particolare:

Per la sezione al km 2+135

- In Figura 58 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 4 di cui sopra;
- In Figura 59 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 5 di cui sopra;
- In Figura 60 si riporta l'andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3 di cui sopra) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso;
- In Figura 61 si riporta l'andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5 di cui sopra.

Per la sezione al km 2+095

- In Figura 62 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 4 di cui sopra;
- In Figura 63 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 5 di cui sopra;
- In Figura 64 si riporta l'andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3 di cui sopra) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso;
- In Figura 65 si riporta l'andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5 di cui sopra.

In Tabella 29 si riportano i cedimenti stimati per un punto in asse al rilevato, alla base dello stesso (derivati da Figura 61 e Figura 65) alla fine della costruzione dell'opera (prima della messa in esercizio, fine della fase 4 di cui sopra) e a "lungo termine" (fine della fase 5 di cui sopra). Nella stessa tabella si riporta il valore del cedimento residuo a "lungo termine" pari alla differenza fra i due precedenti.

Con riferimento ai risultati ottenuti sia in termini di valore assoluto (da inizio costruzione rilevato) che residuo dopo la messa in esercizio dell'opera, si ritiene che i valori di cedimento stimati siano compatibili con la funzionalità dell'opera. I cedimenti che si verificano all'interno del corpo del rilevato sono dell'ordine di poco più di 1 cm (vedi Figura 60 e Figura 64) e possono essere "recuperati" durante la costruzione del rilevato stesso.

Tabella 29: Sintesi sulla valutazione dei cedimenti

Sezione di calcolo	Cedimento a base rilevato, in asse rilevato prima della messa in esercizio (cm)	Cedimento a base rilevato, in asse rilevato a lungo termine (cm)	Cedimento residuo (cm)
RIL05 (km 2+135)	18.3	19.4	1.1
RIL05 (km 2+095)	10.5	10.9	0.4

Output Version 2019.0.0.0

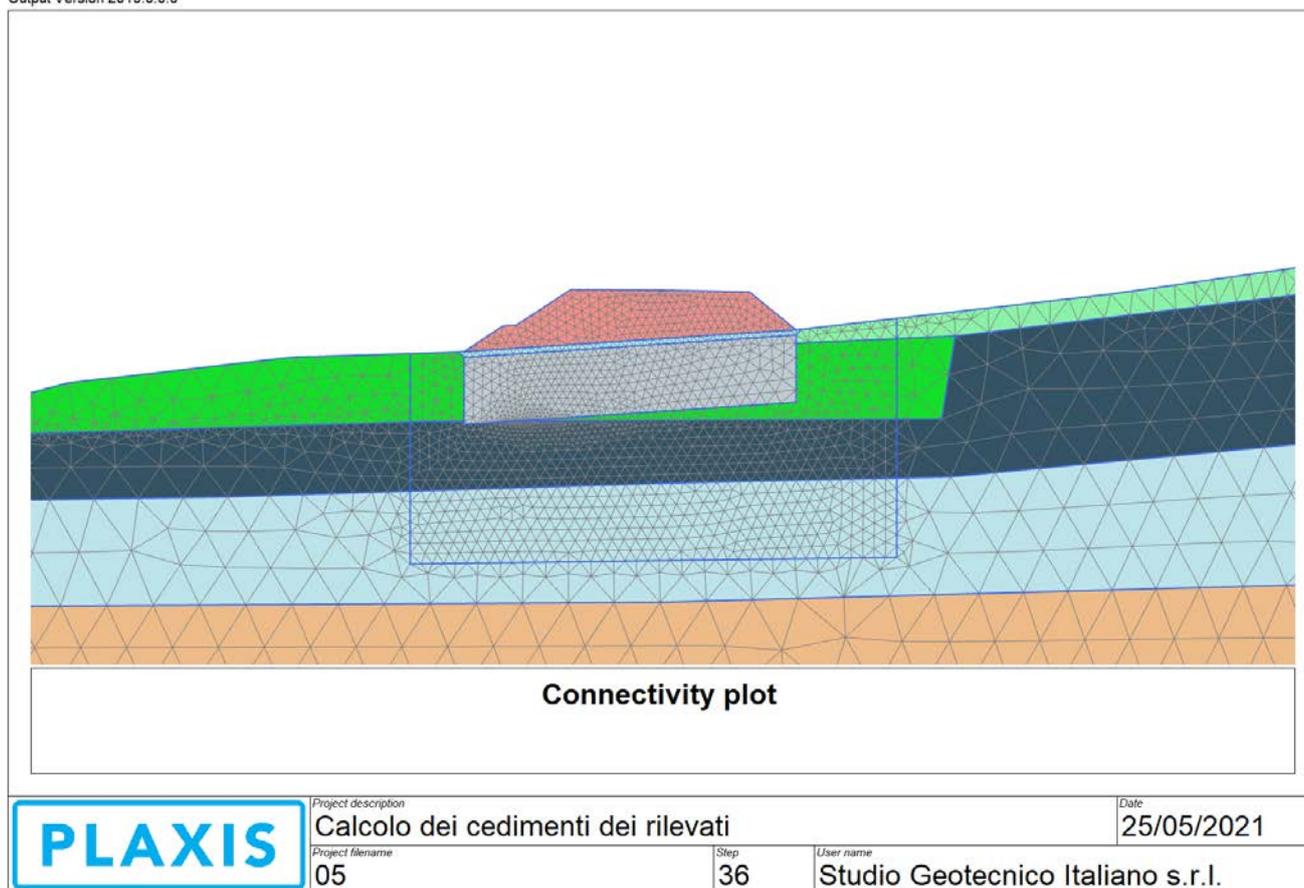


Figura 56 – Modello PLAXIS (con interventi) – Sezione km 2+135

Output Version 2019.0.0.0

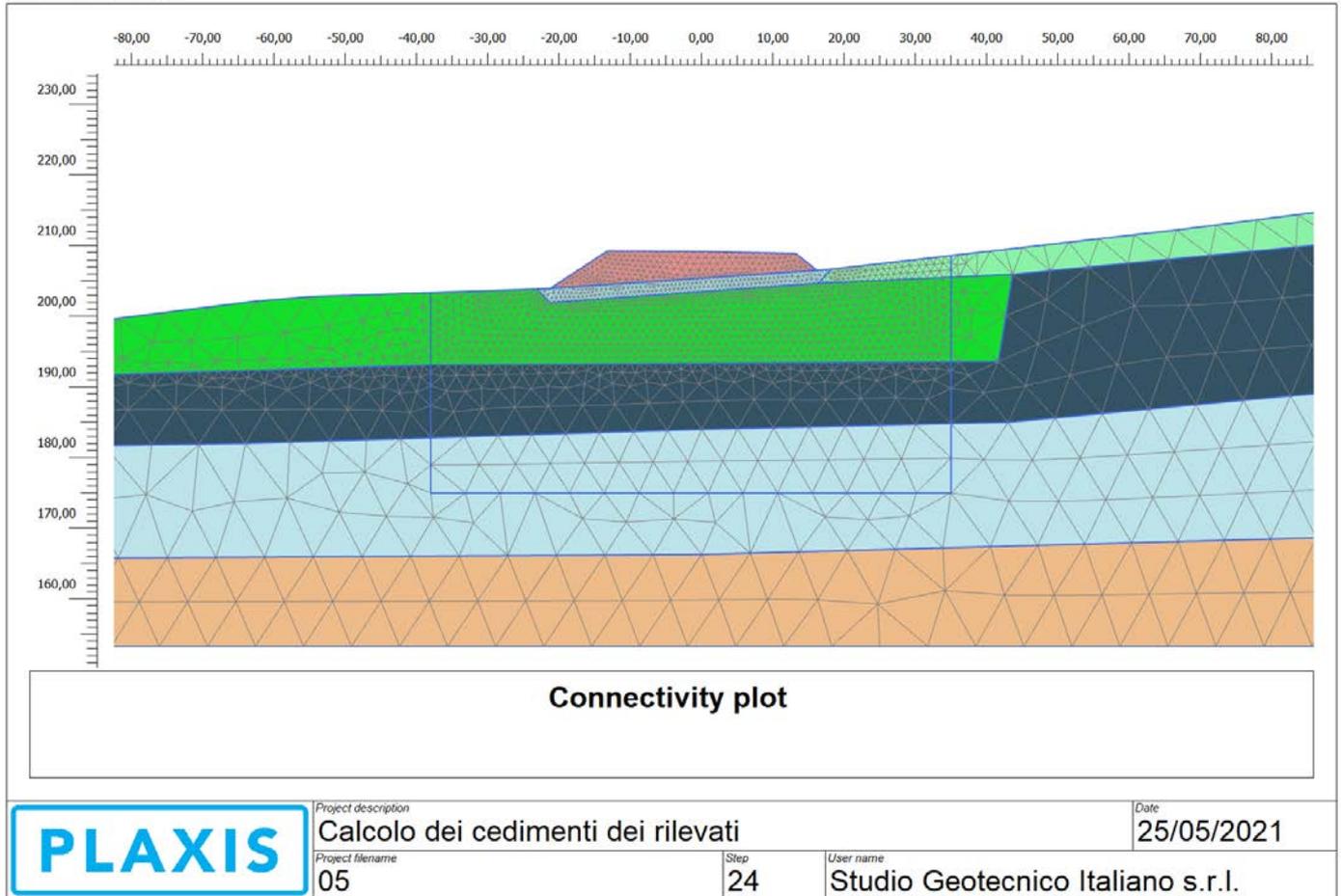


Figura 57 – Modello PLAXIS (con interventi) – Sezione km 2+095

Output Version 2019.0.0.0

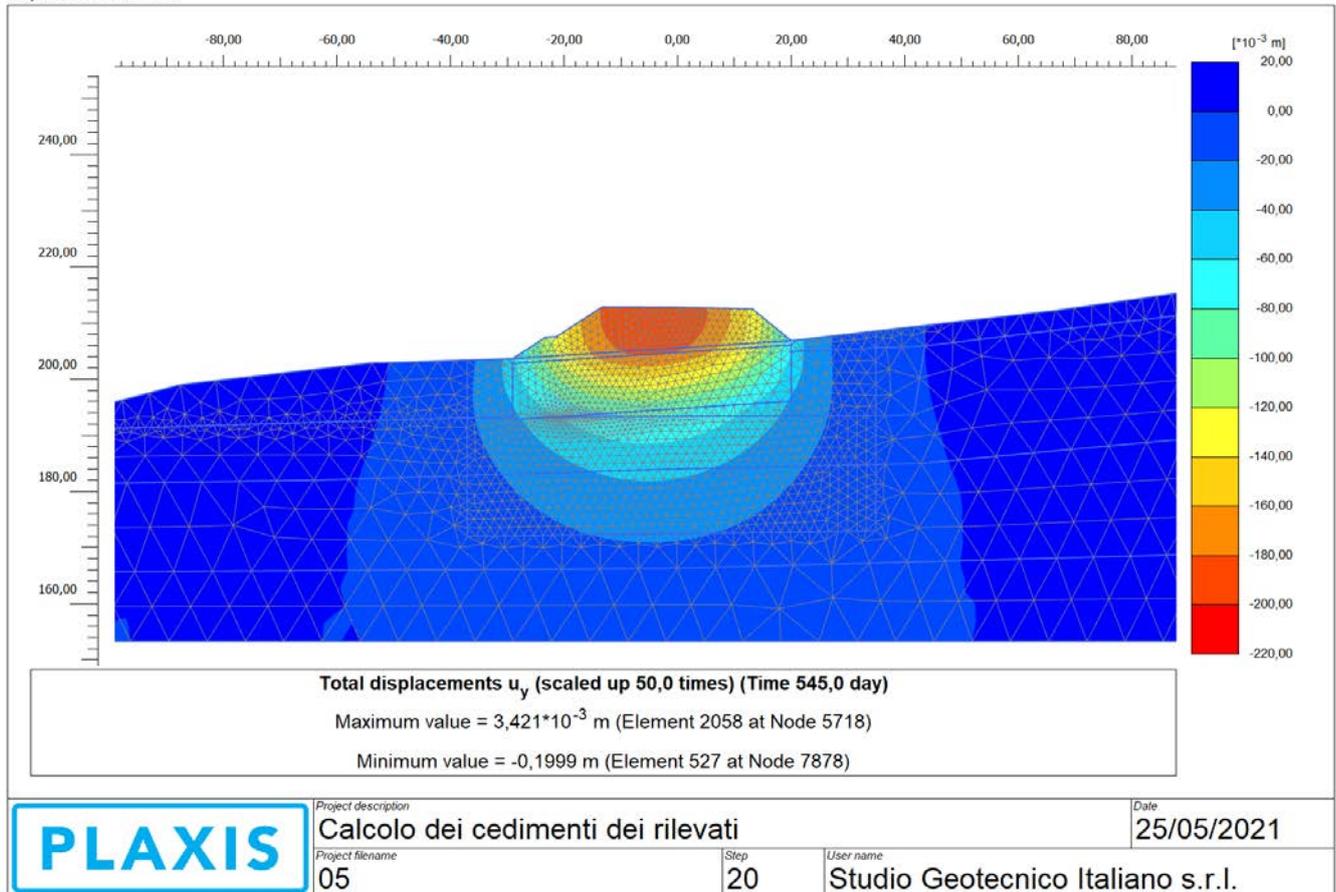


Figura 58: Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+135 – cedimenti del modello a fine fase 4

Output Version 2019.0.0.0

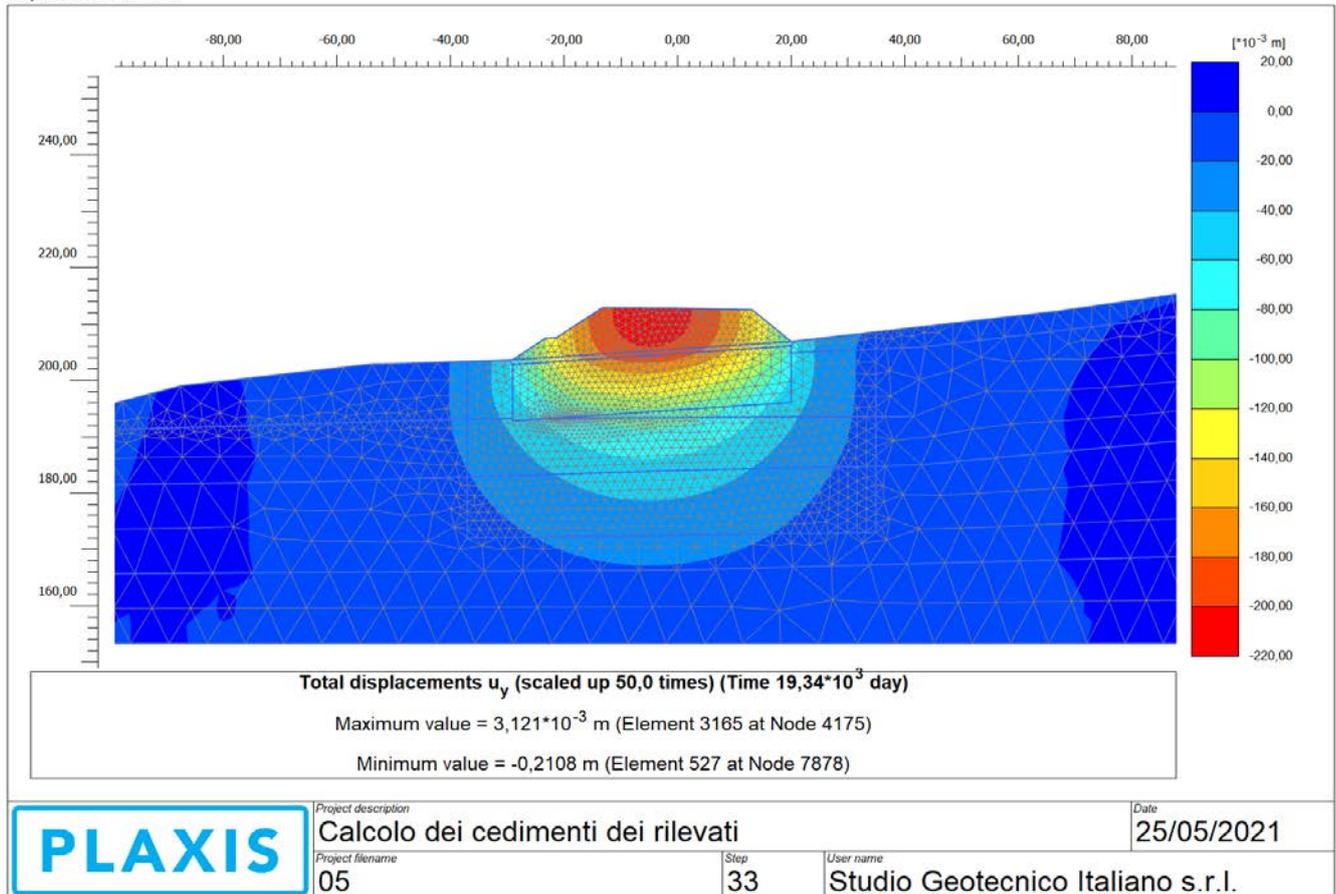


Figura 59 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+135 – cedimenti del modello a fine fase 5

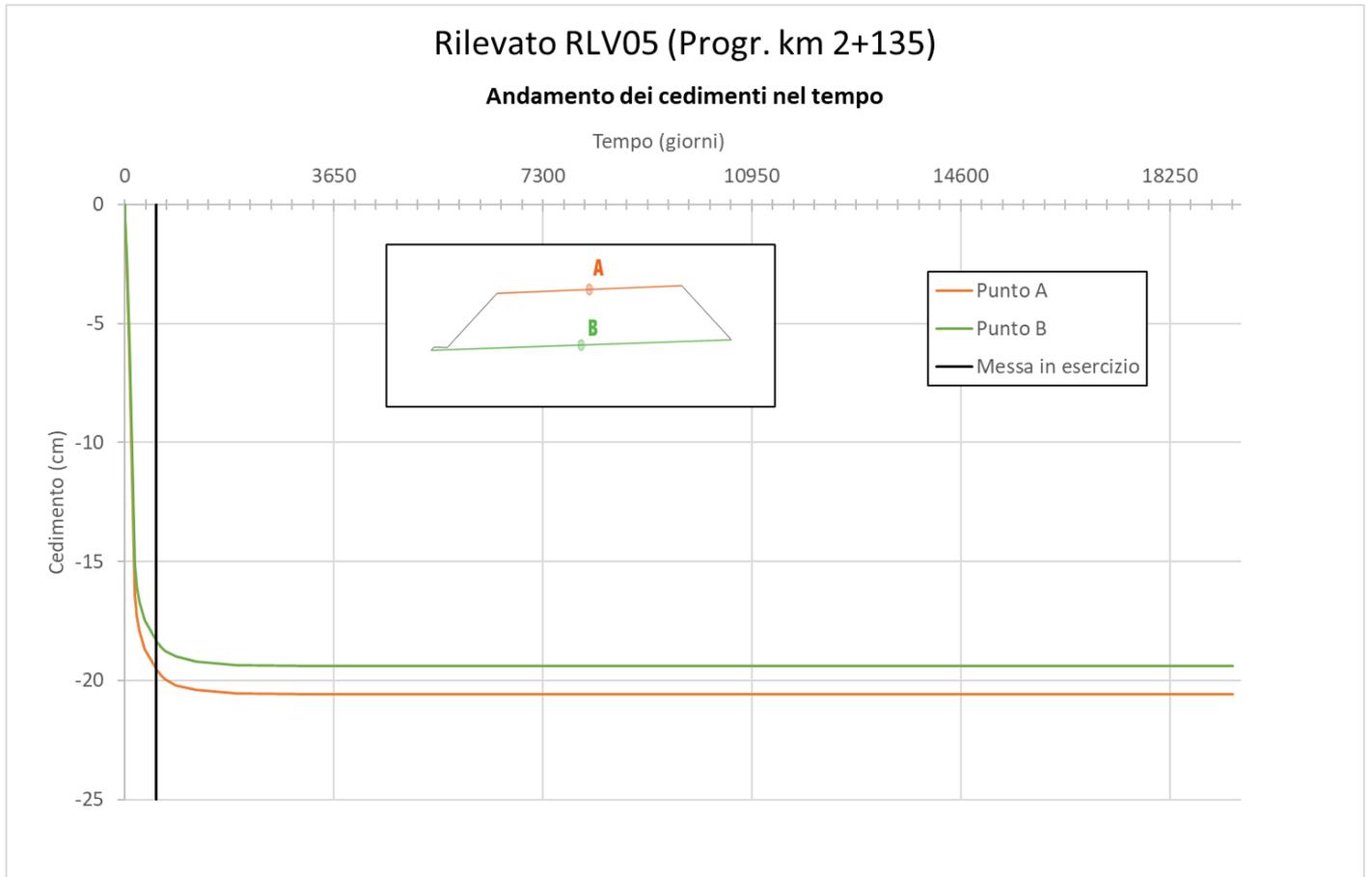


Figura 60 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+135 – andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso

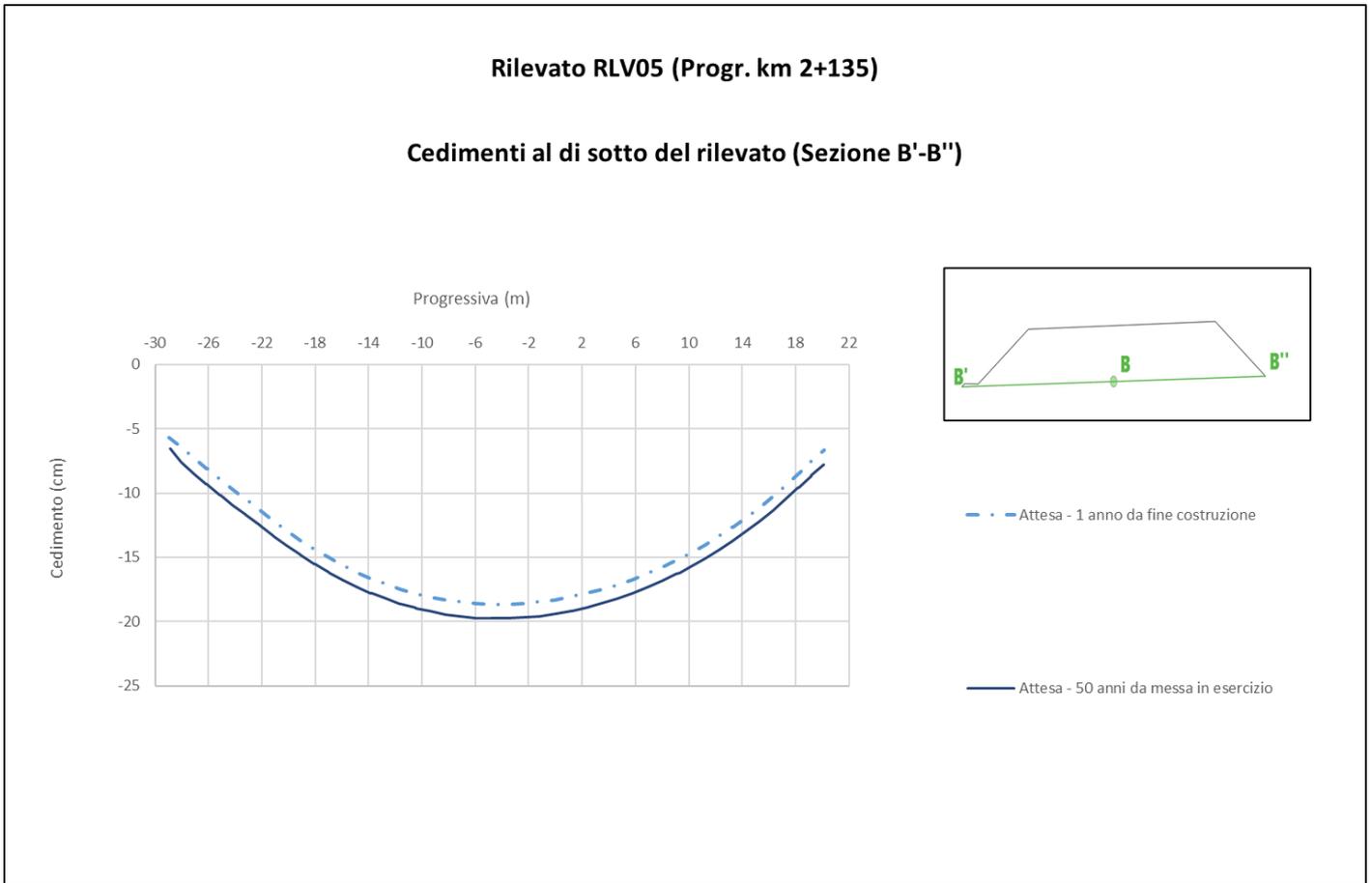


Figura 61 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+135 – andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5

Output Version 2019.0.0.0

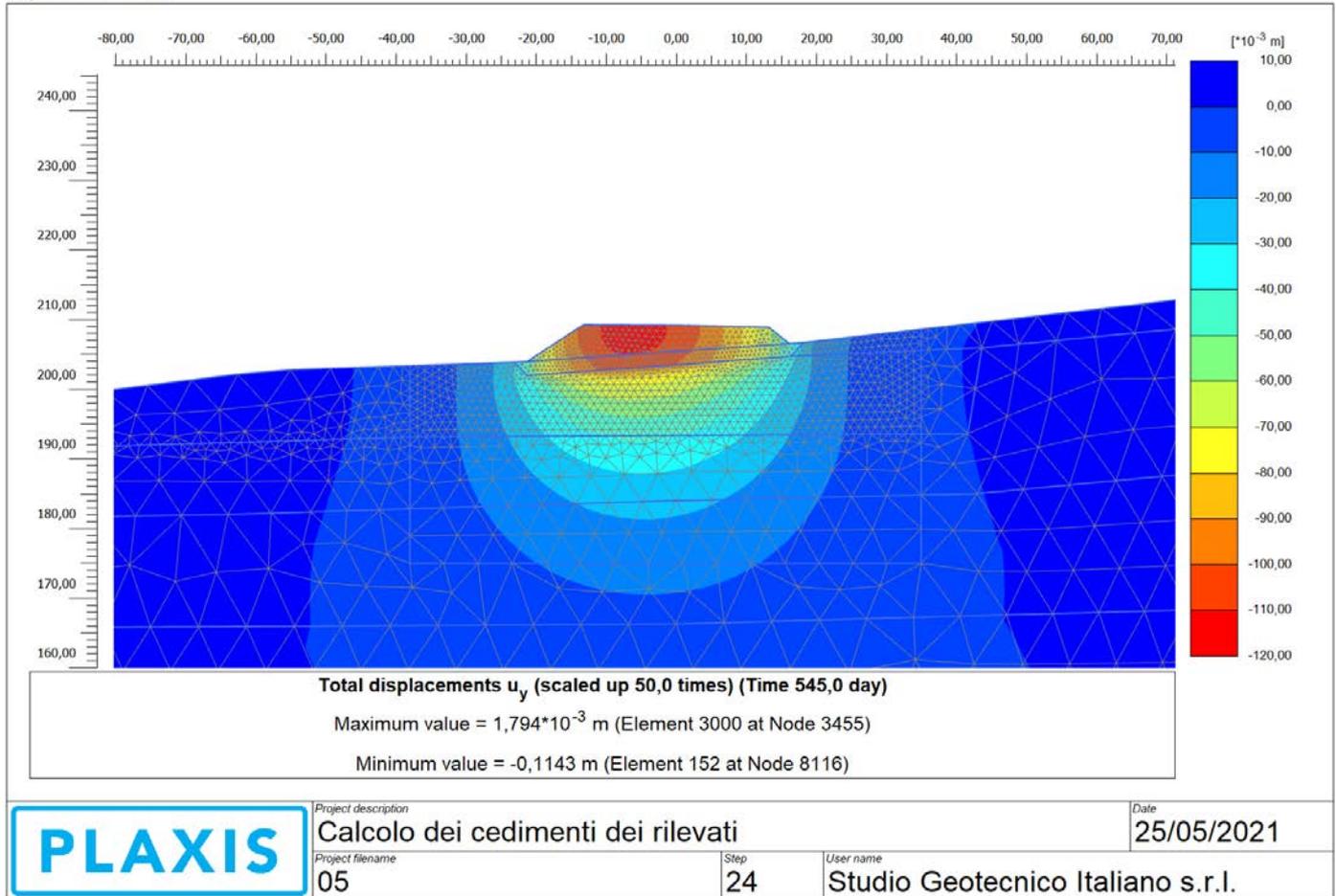


Figura 62: Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+095 – cedimenti del modello a fine fase 4

Output Version 2019.0.0.0

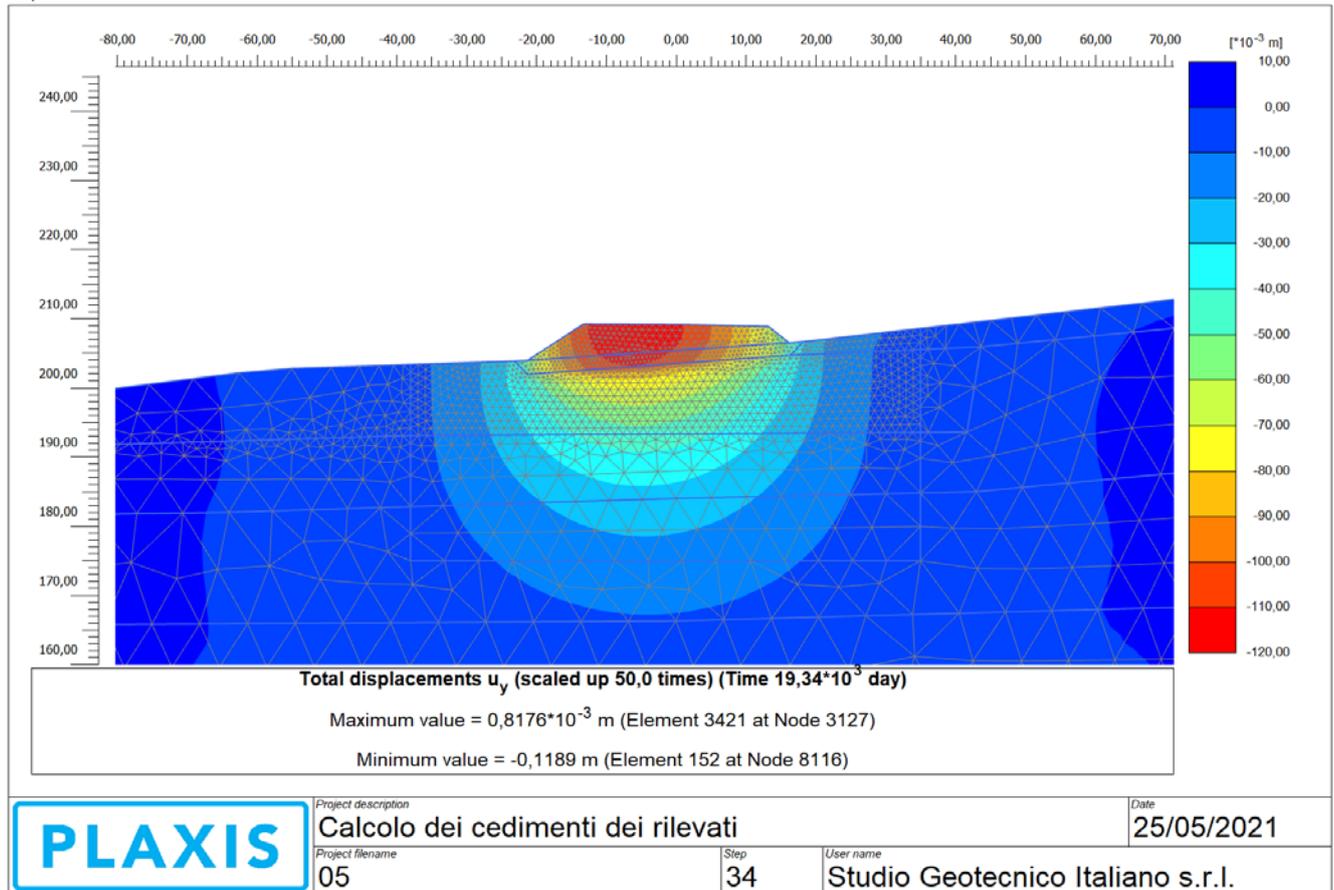


Figura 63 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+095 – cedimenti del modello a fine fase 5

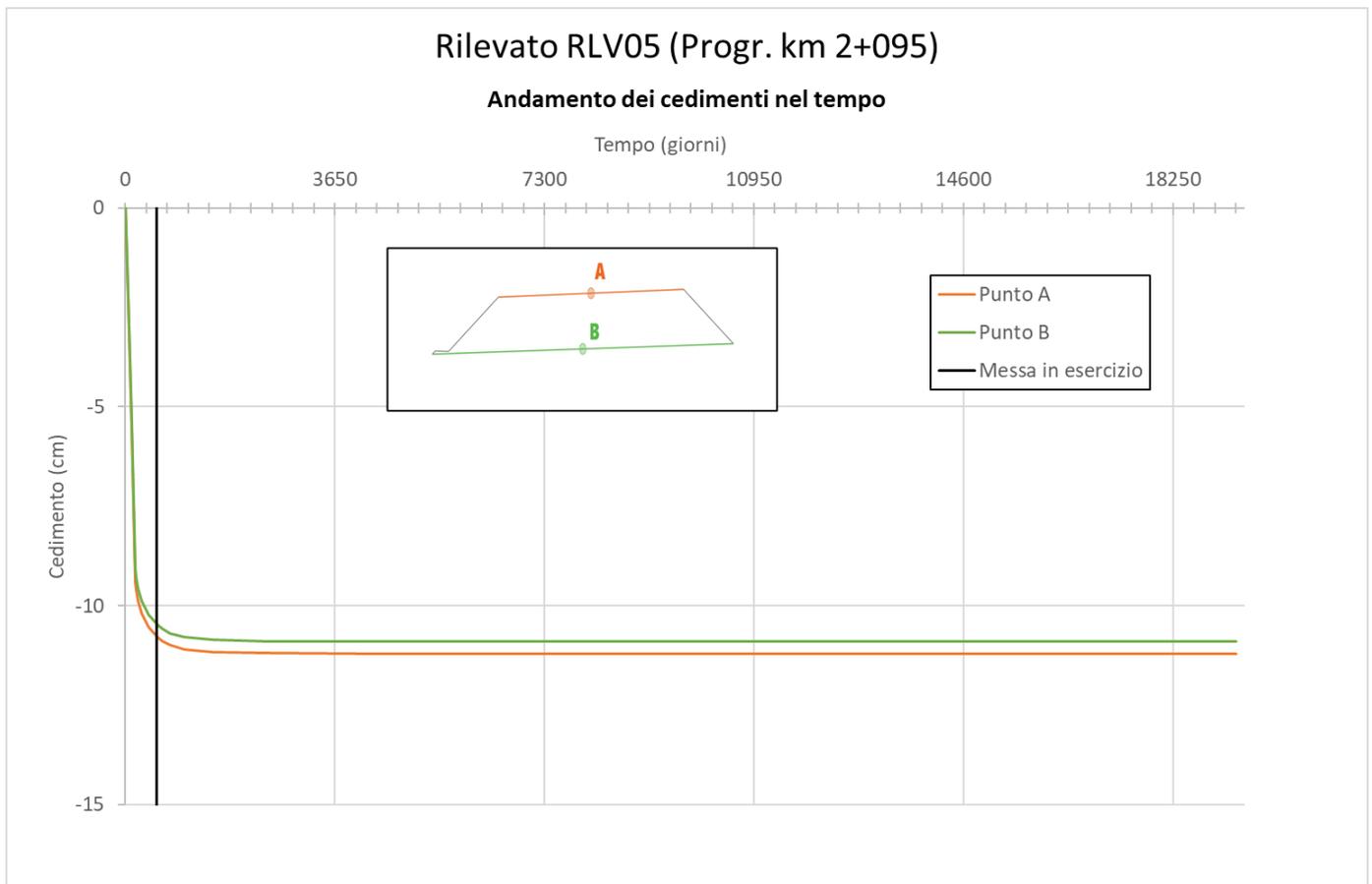


Figura 64 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+095 – andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso

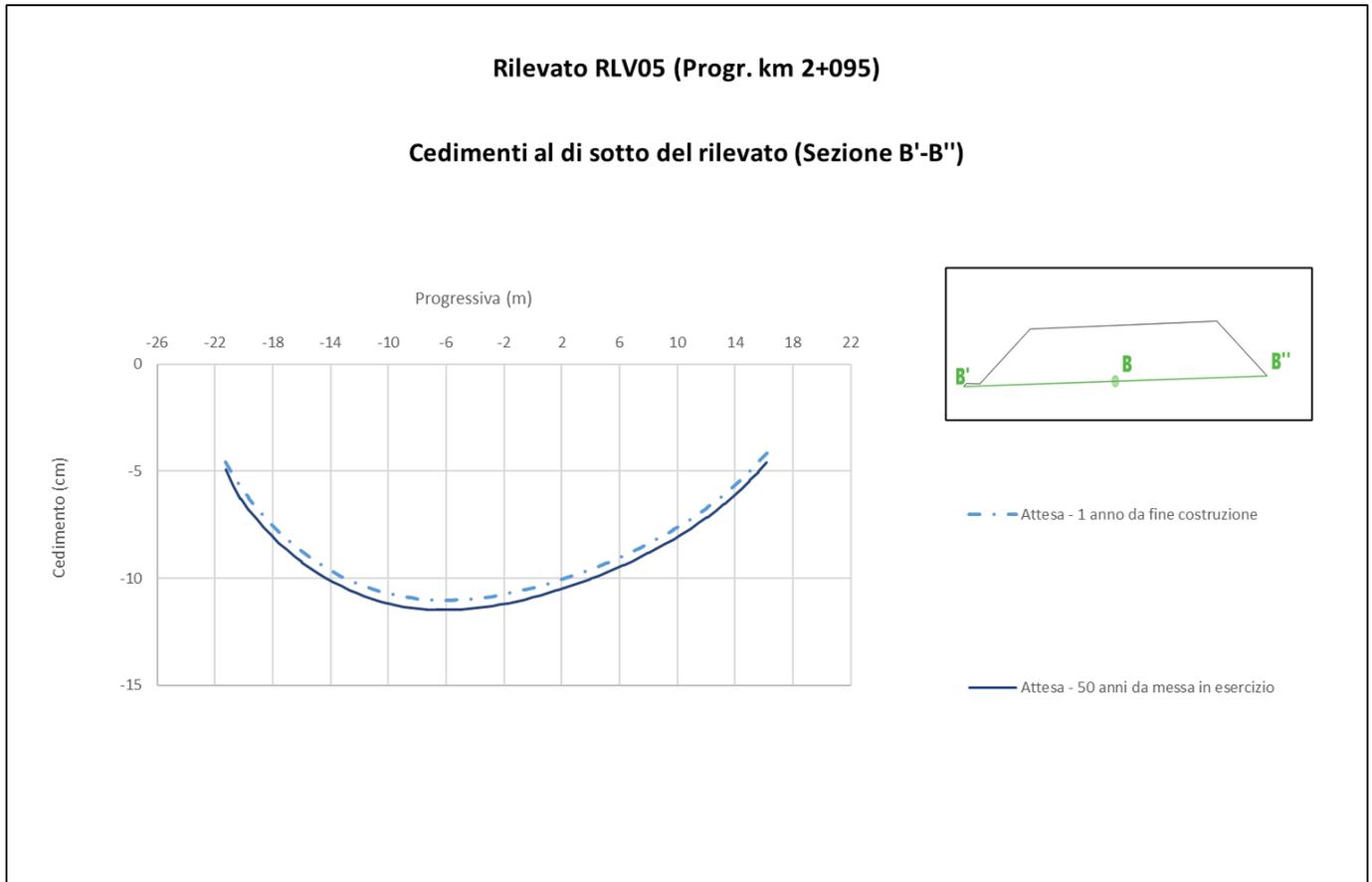


Figura 65 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+095 – andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5

12. RLV06 e RLV07

Oggetto di questo capitolo è il rilevato identificato con come “RLV06 e RLV07” relativo alla tratta autostradale compresa tra il km 2+300 e il km 2+468 (vedi Tabella 6).

In questa zona, sulla base di quanto indicato negli elaborati di geologia, è presente una stratigrafia piuttosto complessa. Nella zona del pianoro più elevato dove comincia a crearsi il rilevato sono presenti strati di formazione gessoso solfifera (GES2 e GES1) per massimo 6 m presunti di spessore; lungo la scarpata affiora direttamente la formazione delle argille marnose di S. Agata; a valle sono presenti al di sopra delle argille marnose i depositi alluvionali del Tanaro, con spessori dell'ordine di 5-6m, nella loro facies a grana fine. Nella zona dove il pendio è meno accentuato, i documenti di geologia indicano la presenza di un deposito di frana quiescente, il quale viene attraversato dal rilevato ove quest'ultimo assume maggiore altezza. Vista la presenza del deposito di frana quiescente e delle alluvioni a grana fine di qualità scadente, nella zona dove il rilevato si estende sul “fondovalle” si prevede di intervenire con trattamento colonnare del terreno di fondazione.

Data la complessa geometria del pendio, il rilevato si stacca da esso prevalentemente sul solo lato di valle, con presenza di un massimo di tre blocchi in terra rinforzata di altezza massima 4.8 m intervallati da berme di 2 m di larghezza. Dove il rilevato si posa sui terreni di fondovalle e assume maggiore altezza, sarà realizzato in terra rinforzata anche sul lato di monte. La parte superiore del rilevato di altezza 1.5 m non contiene rinforzi per permettere la realizzazione del pacchetto stradale.

Le geogriglie saranno di lunghezza variabile tra 6 m e 12m, a interasse 0.6m, con risvolto di 1m, resistenza di progetto a lungo termine $T > 70$ kN/m. Il paramento avrà inclinazione 60° rispetto all'orizzontale.

L'intervento sul terreno di fondazione nella zona dove il rilevato sarà nella zona di fondovalle su alluvioni a grana fine e deposito di frana quiescente consisterà nell'installazione di inclusioni rigide costituite da pali CFA non armati D600mm, L 8 m, a interasse 3.5 m su maglia quinconce. Tra la testa delle inclusioni e la base del rilevato sarà interposto uno strato di ripartizione in ghiaia ben compattata di spessore 0.8m.

A tal proposito, per geometrizzare correttamente i limiti dell'intervento, sono state analizzate tre sezioni; una che corrisponde al km 2+340 dove il rilevato è a due blocchi di terra rinforzata sul solo lato di valle, una seconda che corrisponde al km 2+360 dove il rilevato è a tre blocchi di terra rinforzata sul solo lato di valle, una terza che corrisponde al km 2+450 dove il rilevato è a tre blocchi in terra rinforzata sul lato di valle e a due sul lato di monte con terreno di fondazione trattato con inclusioni rigide (vedi Figura 66, Figura 67 e Figura 68).

Per semplicità il rilevato in terra rinforzata viene trattato come un unico rilevato, anche se si considera per semplicità come RLV06 la porzione di rilevato senza trattamenti del terreno di fondazione e RLV07 la porzione di rilevato con trattamenti del terreno di fondazione.

Tutti gli interventi si rendono necessari in funzione di garantire i requisiti minimi di normativa nei confronti della stabilità del rilevato.

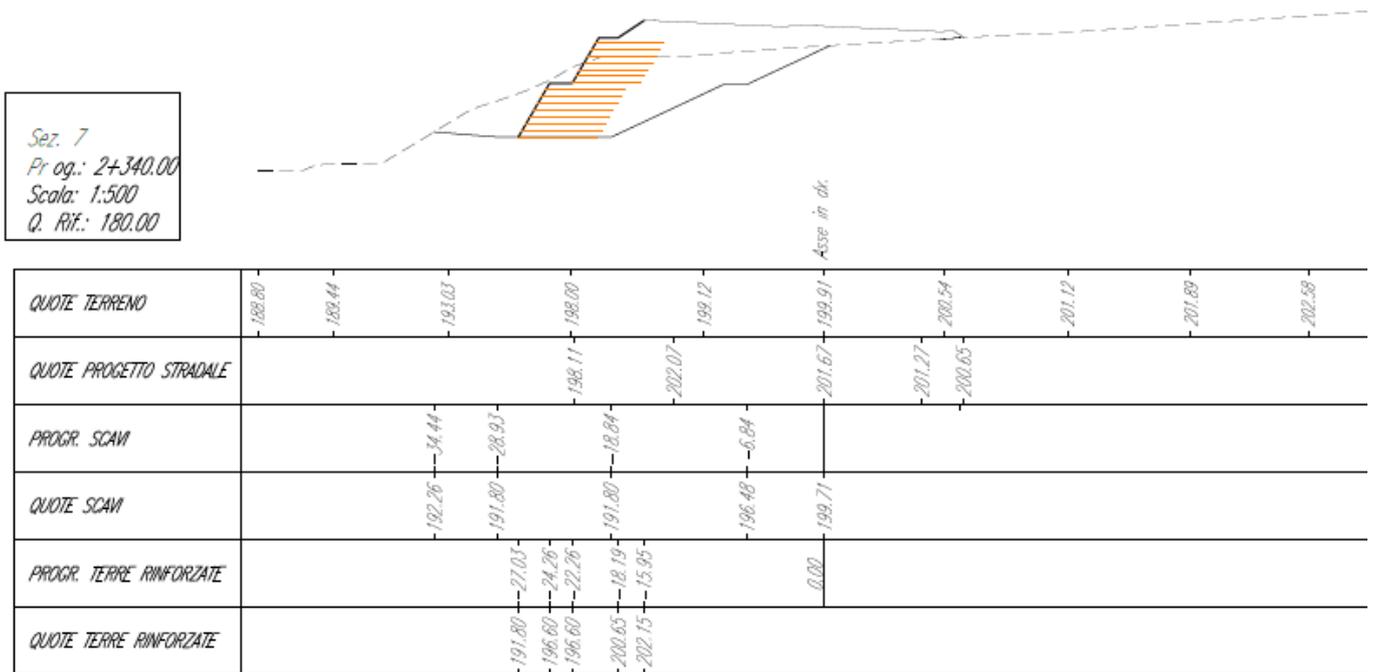


Figura 66: Sezione al km 2+340

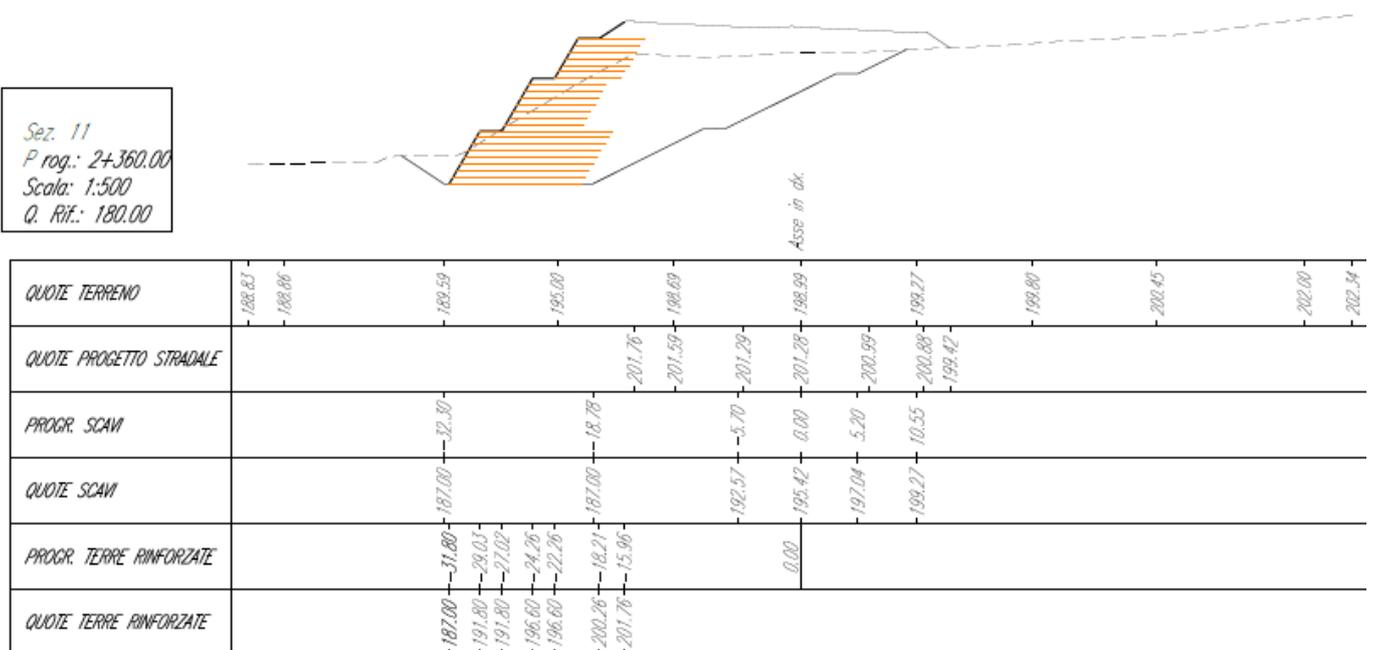


Figura 67: Sezione al km 2+360

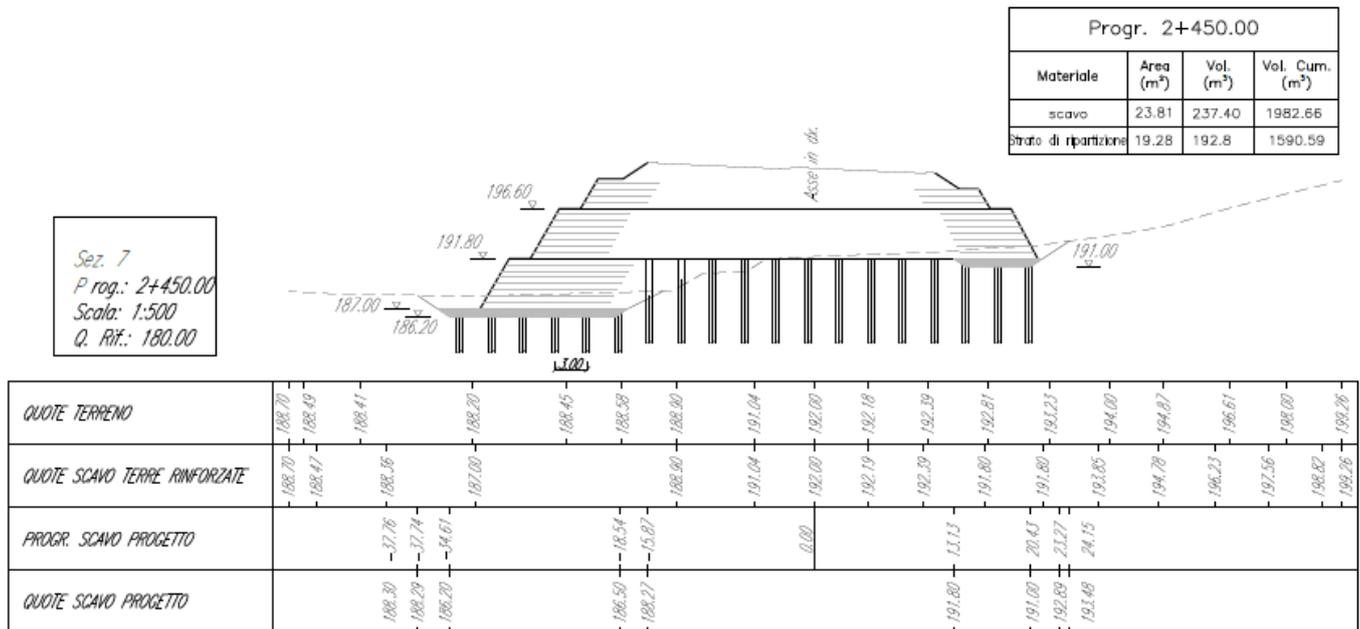


Figura 68: Sezione al km 2+450

12.1. STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

In Tabella 30 sono riportati i valori dei parametri geotecnici caratteristici del terreno naturale. Nella stessa tabella sono riportati anche gli spessori indicativi degli strati; in ogni caso per la stratigrafia lungo la sezione si è fatto riferimento al profilo geotecnico e alle sezioni geotecniche e geologiche, dato che in particolare in quest'area la stratigrafia è molto variabile.

Riguardo al materiale di frana quiescente indicato negli elaborati di geologia, i parametri di resistenza sono stati ipotizzati pari a quelli dell'unità b1-F, comunque ininfluenti ai fini dell'analisi preliminare in quanto tale strato, ove presente, sarà completamente attraversato dalle colonne di trattamento.

Con riferimento ai materiali antropici (rilevato e ripartitore) si rimanda alla Tabella 7, con l'eccezione che per i riempimenti nel caso specifico si considera cautelativamente un angolo di attrito caratteristico più basso pari a 35°.

La falda di progetto è stata assunta per le verifiche SLU in condizioni statiche come prossima al piano campagna (a circa 1 m di profondità), considerando però che la porzione di materiale di rilevato sarà drenante e quindi la falda non risalirà al di sopra della base dei riempimenti.

Per le verifiche SLU in condizioni sismiche la falda di progetto è invece stata assunta variabile tra 1 m e 4 m di profondità, come rappresentata sul profilo geotecnico.

Per le verifiche SLE (valutazione dei cedimenti), la falda di progetto è stata assunta sempre variabile tra 1 m e 4 m di profondità, come rappresentata sul profilo geotecnico.

Per maggiore dettaglio si rimanda alla relazione geotecnica di progetto (Doc. Rif. [9.]). Si segnala solamente che la falda nella zona di piana alluvionale è comunque indicata a basse profondità da piano campagna.

Tabella 30: Parametri geotecnici di calcolo dei materiali in sito

Unità	Prof. da [m da p.c.]	Prof. a [m da p.c.]	γ kN/m ³	φ' °	c' kPa	c_u kPa	E'_{op} [Mpa]	Cc [-]	Cr [-]	e_0 [-]	OCR [-]
b1-F / Coltri F	0	5	19	21	0	-	2.5	-	-	-	-
Depositi alluvionali	0	5	18.5	21	0	-		-	-	-	-
GES2	0	3	19	21	10	150	-	0.18	0.034	0.6	2
GES1	0-3	6	21	21	20	200	-	0.18	0.034	0.6	2
SAF	0-6	>0-6	19	21	25	250	-	0.17	0.05	0.7	2

12.2. STABILITÀ E DIMENSIONAMENTO DEI RINFORZI

12.2.1. Verifiche di sicurezza

Per le terre rinforzate vengono effettuate le seguenti verifiche esterne degli SLU di tipo geotecnico (GEO):

- scorrimento sul piano di posa;
- stabilità interna;
- stabilità globale del complesso opera di sostegno – terreno;

Le verifiche sono svolte con l'ausilio del codice di calcolo Macstars W [23.].

Per quanto riguarda la stabilità interna, il codice di calcolo considera la presenza dei rinforzi tenendo conto di una forza stabilizzante presa come il minimo tra la resistenza a rottura (di lungo termine) e la resistenza allo sfilamento offerta dalle geogriglie.

12.2.2. Scorrimento

La verifica di scorrimento consiste nell'accertare che le azioni di progetto in direzione orizzontale (sostanzialmente la componente orizzontale della spinta della terra) sia inferiore alla resistenza di progetto, data dall'attrito che si sviluppa all'interfaccia tra la base dell'opera ed il piano di imposta.

Le verifiche, in accordo alle NTC2018, sono effettuate secondo l'Approccio 2 (coefficienti A1+M1+R3).

Il coefficiente γ_R deve essere almeno uguale a 1.1 in statica (Tabella 31), almeno pari all'unità in sismica.

Lo scorrimento viene verificato per tutti e tre i blocchi di terra rinforzata. Per tutti i blocchi il materiale considerato all'interfaccia è il materiale del rilevato (si prevede che anche al di sotto del blocco inferiore ci sia un minimo di spessore di scotico e bonifica).

Poiché per le verifiche SLU-GEO il codice di calcolo Macstars W [23.] fa riferimento alle NTC2008, le verifiche allo scorrimento sono eseguite considerando la combinazione di fattori parziali A1+M1+R3 in condizioni statiche e M1+R1+ $k_{h\pm}k_v$ in condizioni sismiche. La verifica viene ritenuta soddisfatta se il valore del fattore di sicurezza risulta pari ad almeno 1 per le entrambe le condizioni statiche e 1 sismiche, in quanto il fattore γ_R è già considerato all'interno della verifica solo nel primo caso, ma nel secondo deve comunque risultare $\gamma_R = 1$.

Tabella 31: Coefficienti parziali per le verifiche agli stati limite ultimi dei muri di sostegno (Tabella 6.V.I delle NTC2018)

Verifica	Coefficiente parziale (R3)
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R = 1,4$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$
Ribaltamento	$\gamma_R = 1,15$
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R = 1,4$

12.2.3. Stabilità interna e stabilità globale

La verifica di stabilità viene effettuata con i metodi cosiddetti “dell'equilibrio limite” tipici delle analisi di stabilità dei pendii, che consistono nell'individuare diverse possibili superfici di scivolamento che coinvolgono il terreno sostenuto dall'opera e quello di fondazione e nell'analizzare, per ciascuna di esse, l'equilibrio allo scivolamento del cuneo di materiali soprastanti, considerato come se fosse rigido.

I vari metodi di calcolo dell'equilibrio limite disponibili in letteratura (Bishop, 1955; Janbu, 1973; Morgenstern e Price, 1965; Fellenius, 1927; etc.), si basano tutti sulle ipotesi seguenti:

- il coefficiente di sicurezza è definito come rapporto tra resistenza al taglio e sforzo di taglio mobilitato lungo la ipotetica superficie di scorrimento;
- il coefficiente di sicurezza (FS), che per la superficie corrispondente alla rottura è unitario, è costante in tutti i punti della superficie di scorrimento;
- la rottura avviene per il raggiungimento, contemporaneamente in tutti i punti della superficie di scorrimento, della resistenza limite.

Tra i metodi per il calcolo del fattore di sicurezza si è optato per quello proposto da Bishop, 1955 con superficie circolare.

In accordo alle NTC2018, la verifica di stabilità dell'insieme opera di sostegno – terreno deve essere effettuata come segue:

- Condizioni statiche: Approccio 1 - Combinazione 2 (coefficienti parziali A2+M2+R2),
- Condizioni sismiche: Coefficienti su azioni e parametri geotecnici pari all'unità e coefficiente parziale sulle resistenze calcolate $\gamma_R = 1,2$.

La adotta lo stesso approccio anche per le verifiche di stabilità interna.

Per i coefficienti parziali in statica e sismica fare riferimento a Tabella 32.

Si verifica che valga: $\tau_m \leq \tau_s / \gamma_R$

Dove:

τ_m = sforzo di taglio mobilitato

τ_s = sforzo di taglio disponibile

γ_R = coefficiente globale sulla resistenza di calcolo

Poiché per le verifiche SLU-GEO il codice di calcolo Macstars W [23.] fa riferimento alle NTC2008, le verifiche di stabilità sono eseguite considerando la combinazione di fattori parziali A2+M2+R2 in condizioni statiche e M1+R1+ $k_h \pm k_v$ in condizioni sismiche. La verifica viene ritenuta soddisfatta se il valore del fattore di sicurezza risulta pari ad almeno 1 per le condizioni statiche e 1.2 in condizioni sismiche, in quanto il fattore γ_R è già considerato all'interno della verifica solo nel primo caso.

Tabella 32: Coefficienti parziali per verifiche di stabilità

VERIFICA	γ_F			γ_M				γ_R
	Permanenti sfavorevoli		Variabili sfavorevoli	$\tan(\phi')$	c'	c _u		
	Strutturali e permanenti definiti	Permanenti non definiti						
STATICA	1,0	1,3	1,3	1,25	1,25	1,40		1,1
SISMA_SLV	1,0 (1)	1,0 (1)	1,0 (1)	1,0 (1)	1,0 (1)	1,0 (1)		1,2

(1) §7.11.4 NTC

12.2.4. Risultati

12.2.4.1. Scorrimento

Le verifiche allo scorrimento sul piano di posa della terra rinforzata risultano sempre soddisfatte in quanto FS è sempre maggiore di 1. I risultati sono riportati per semplicità per il solo blocco inferiore in quanto sempre il più critico nelle figure da Figura 69 a Figura 74.

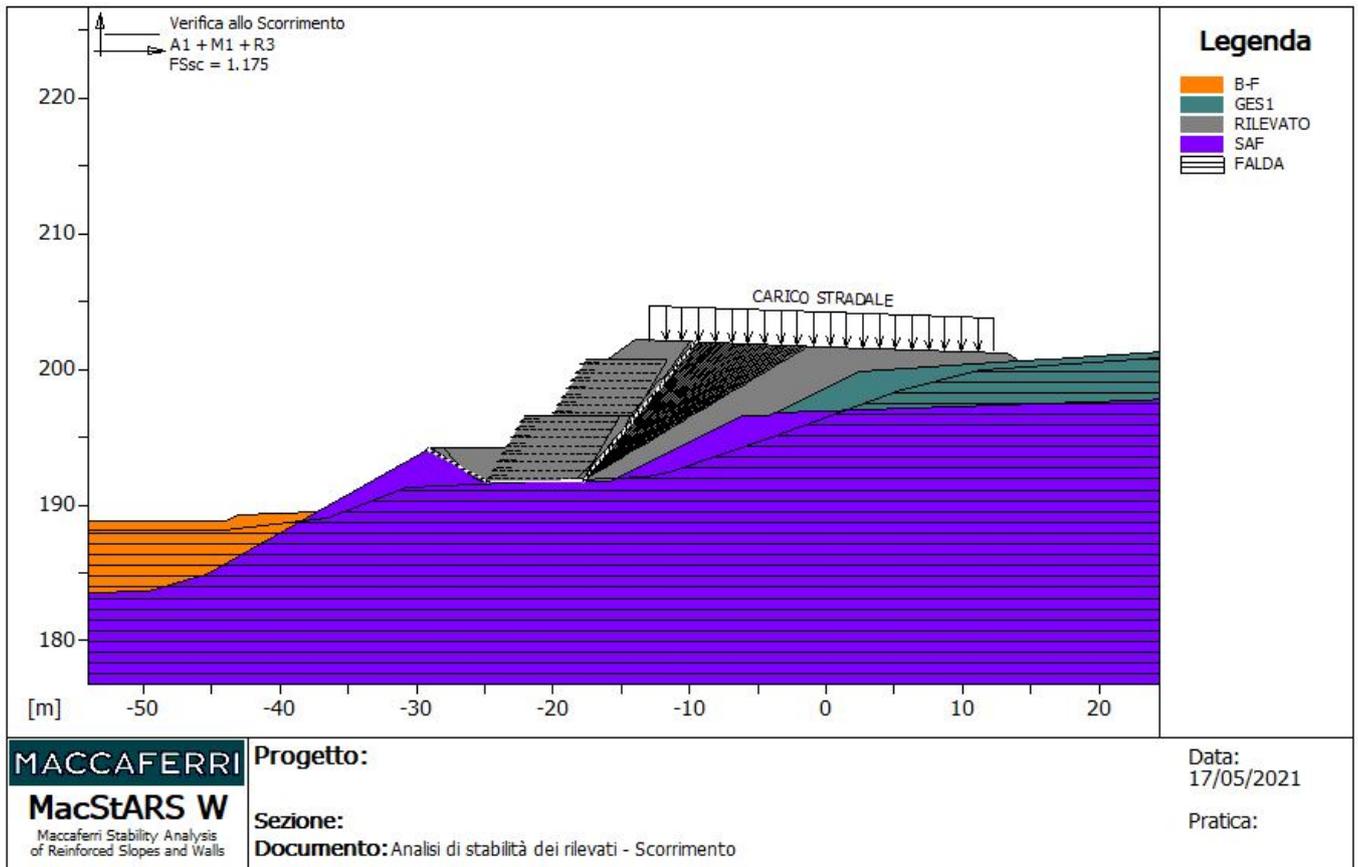


Figura 69: Modello MACSTARS – Sezione km 2+340 – Condizioni statiche
 Verifica allo scorrimento sul blocco inferiore

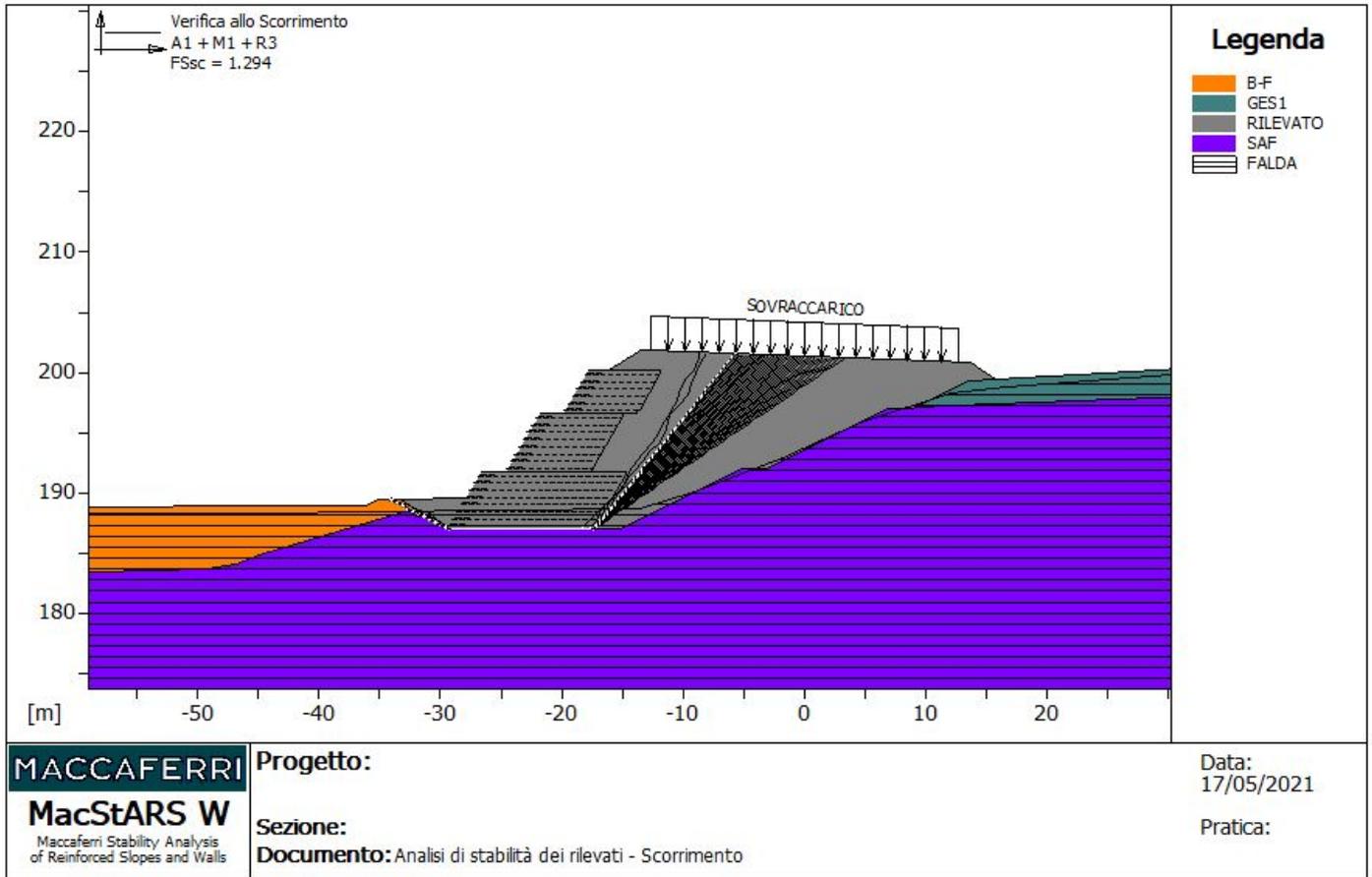


Figura 70: Modello MACSTARS – Sezione km 2+360 – Condizioni statiche
 Verifica allo scorrimento sul blocco inferiore

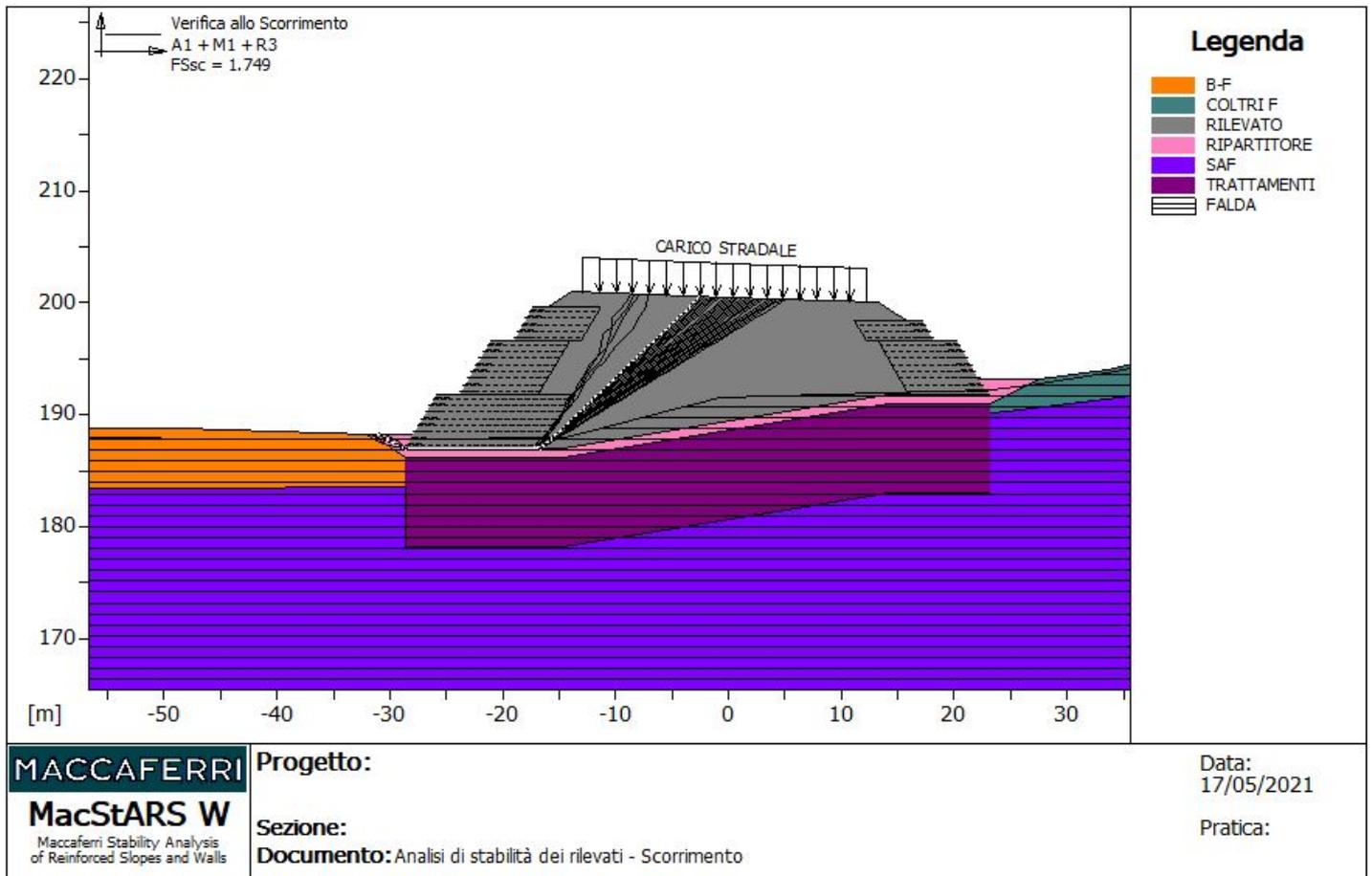


Figura 71: Modello MACSTARS – Sezione km 2+450 – Condizioni statiche
Verifica allo scorrimento sul blocco inferiore

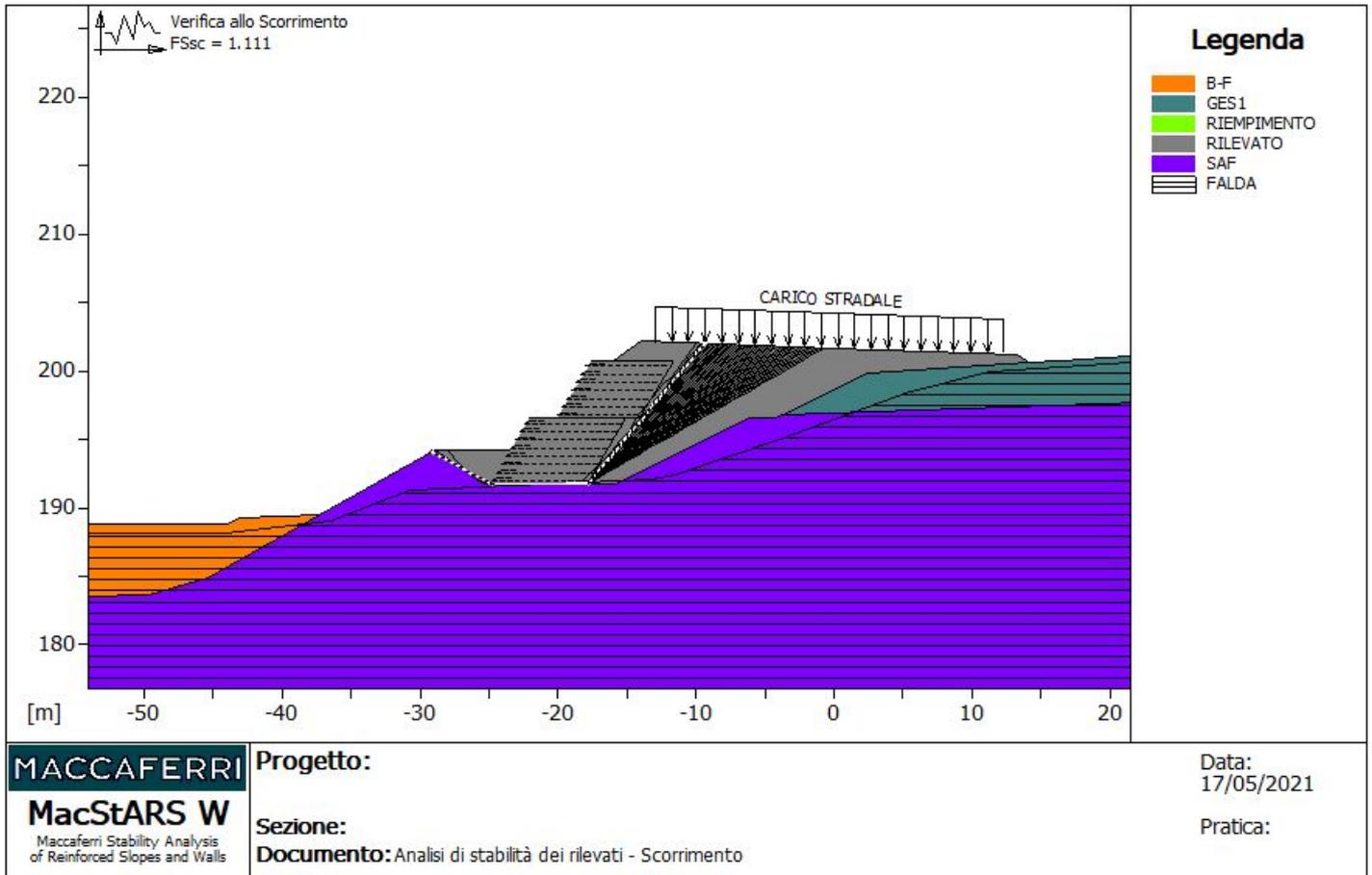


Figura 72: Modello MACSTARS – Sezione km 2+340 – Condizioni sismiche
 Verifica allo scorrimento sul blocco inferiore

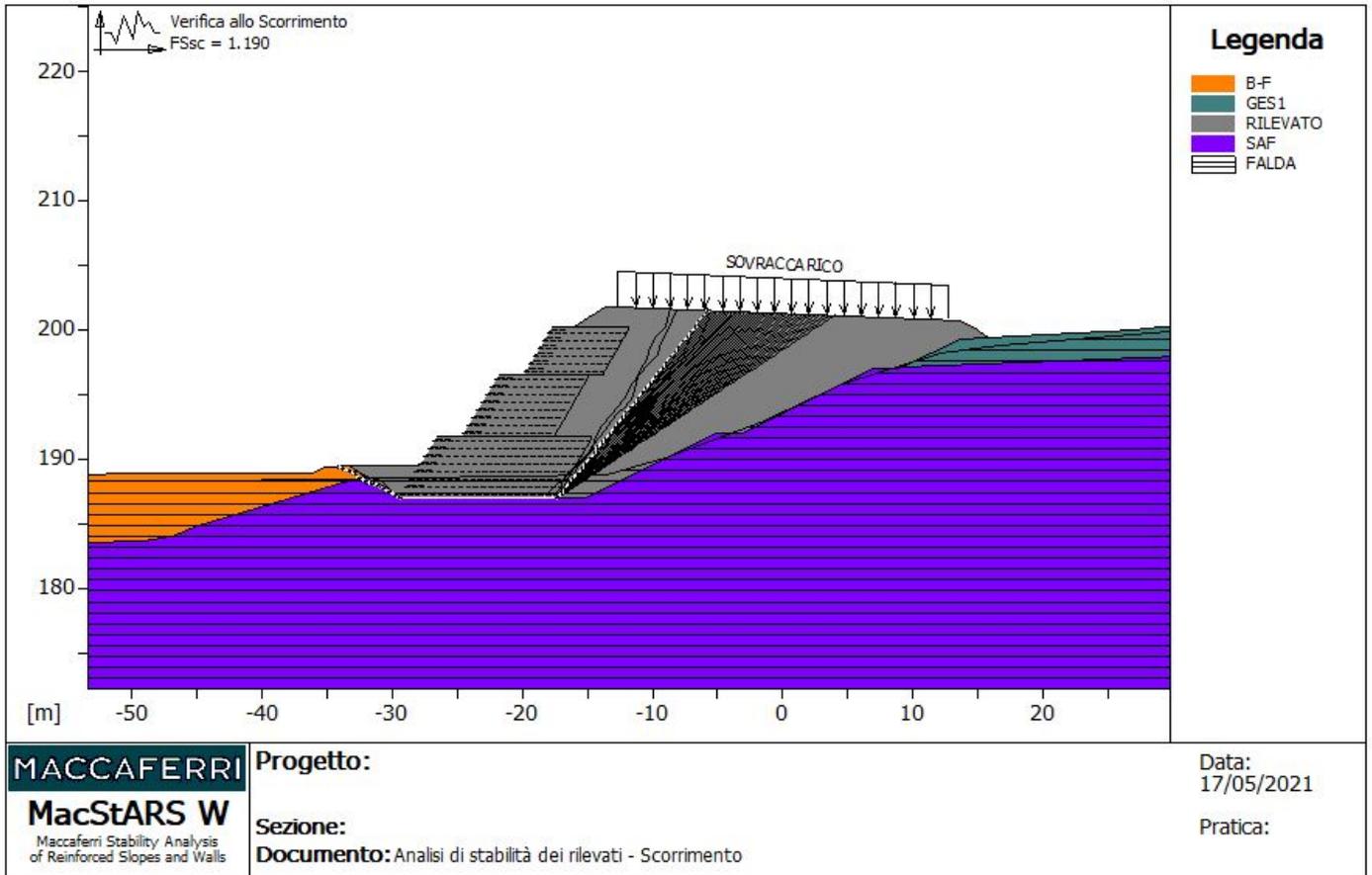


Figura 73: Modello MACSTARS – Sezione km 2+360 – Condizioni sismiche
 Verifica allo scorrimento sul blocco inferiore

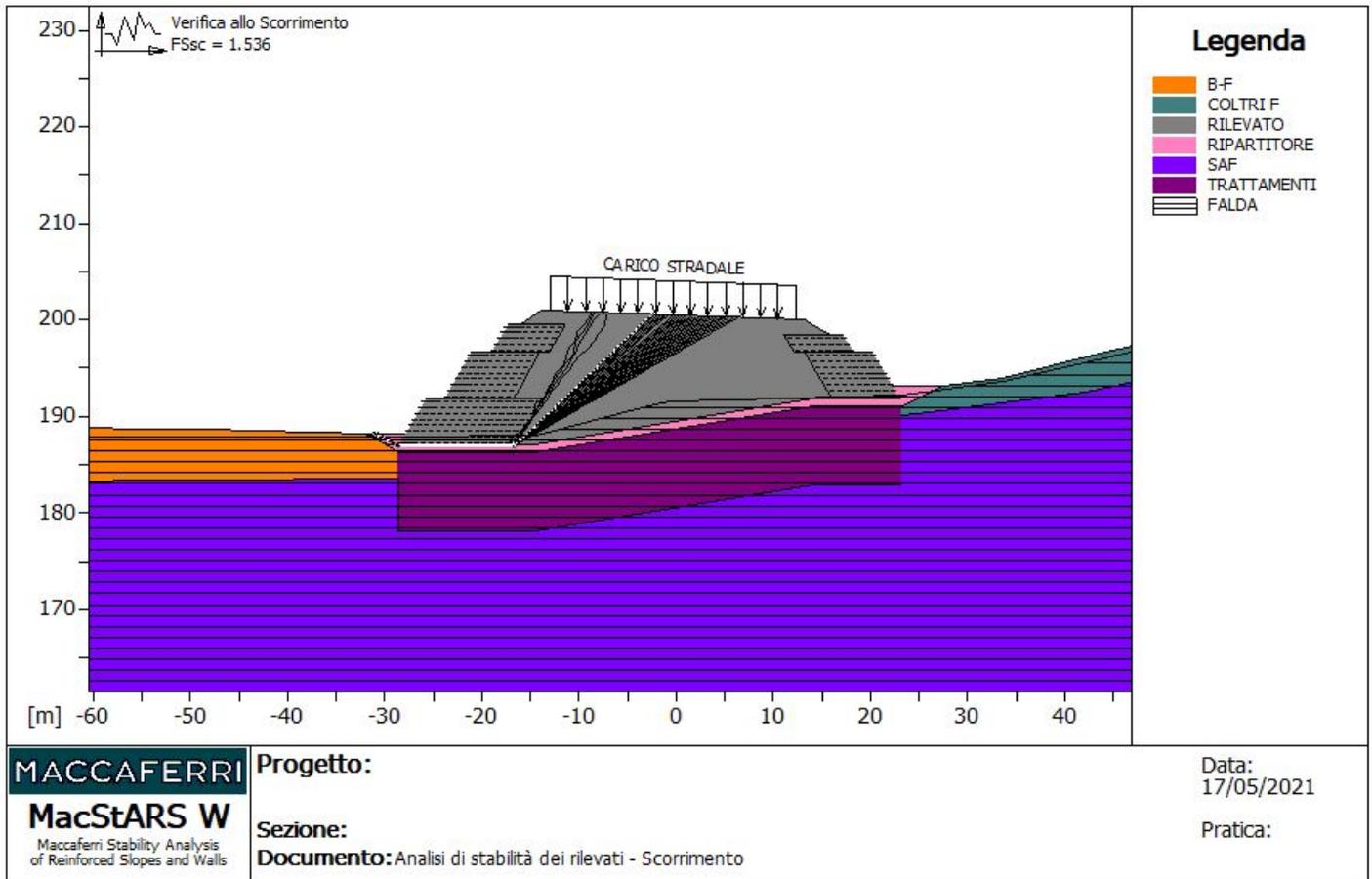


Figura 74: Modello MACSTARS – Sezione km 2+450 – Condizioni sismiche
 Verifica allo scorrimento sul blocco inferiore

12.2.4.2. Stabilità interna

Le verifiche di stabilità interna della terra rinforzata risultano sempre soddisfatte in quanto FS è sempre maggiore di 1 in condizioni statiche e 1.2 in condizioni sismiche. I risultati sono riportati per semplicità per il solo blocco inferiore in quanto sempre il più critico nelle figure da Figura 75 a Figura 80. In particolare, per quanto riguarda la stabilità interna, si evidenzia come le superfici di scivolamento (con FS sufficientemente elevato) non attraversano i rinforzi, quindi la verifica a sfilamento e rottura si ritiene implicitamente soddisfatta. Dato che le verifiche sono effettuate con geogriglie con resistenza nominale $T = 100 \text{ kN/m}$ e il codice di calcolo applica internamente un coefficiente di sicurezza sui materiali pari a 1.52, la resistenza della geogriglia a lungo termine da considerare per il progetto risulta pari a $100/1.52 = 65.8 \text{ kN/m}$, il che arrotondando per eccesso si traduce in una resistenza di progetto al lungo termine della geogriglia $T_{LT} > 70 \text{ kN}$.

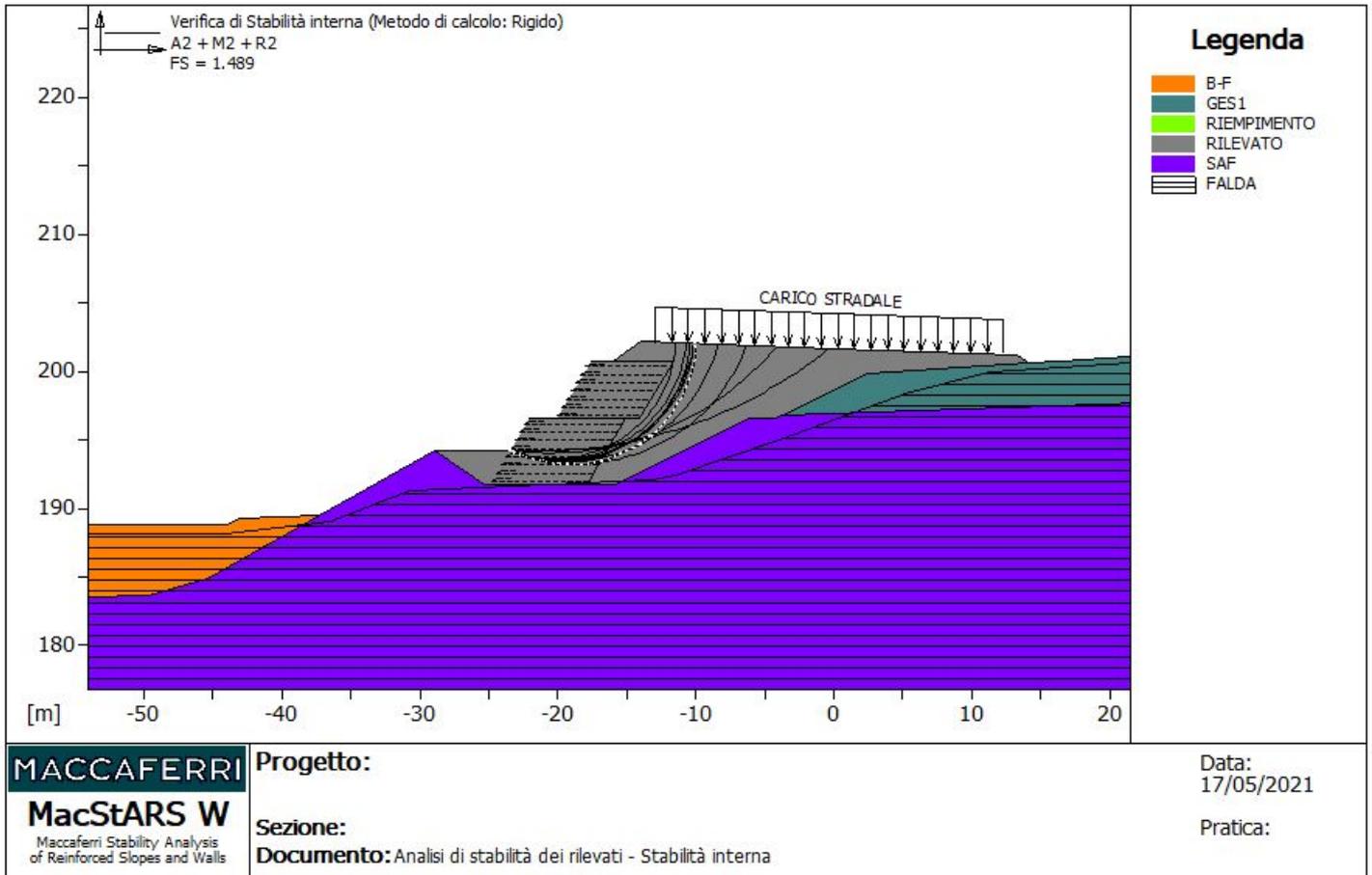


Figura 75: Modello MACSTARS – Sezione km 2+340 – Condizioni statiche
Verifica di stabilità interna sul blocco inferiore

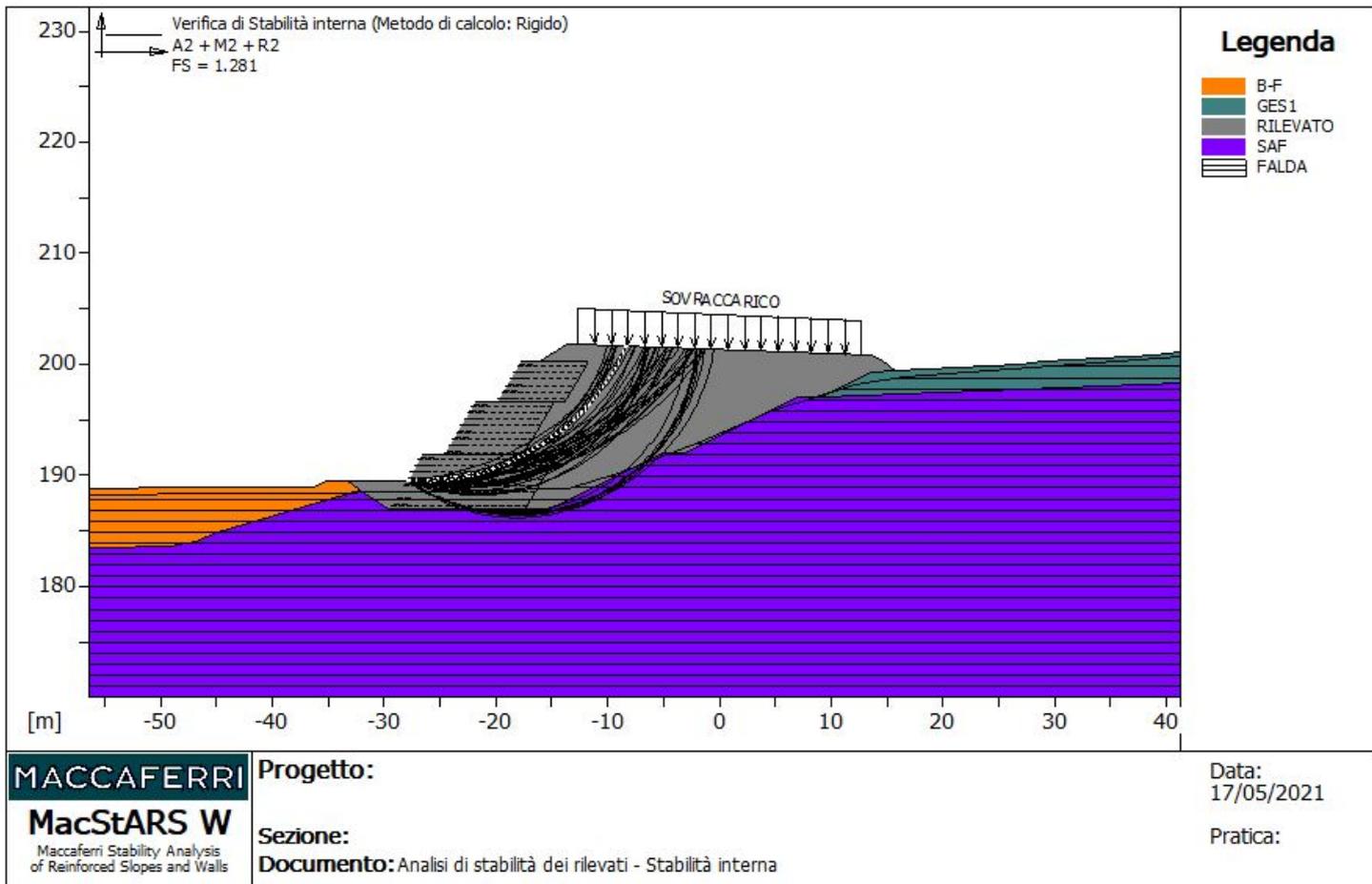


Figura 76: Modello MACSTARS – Sezione km 2+360 – Condizioni statiche
Verifica di stabilità interna sul blocco inferiore

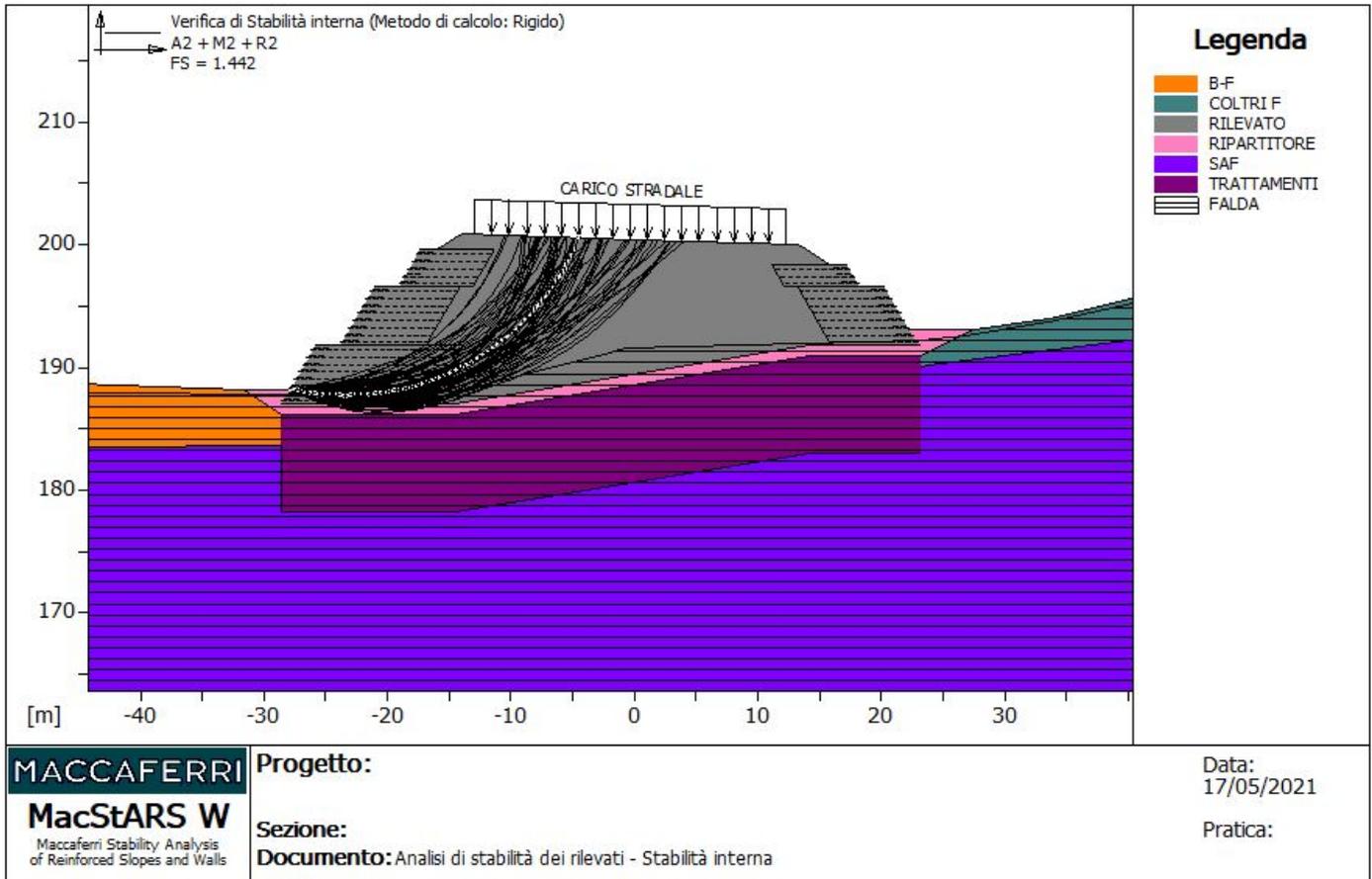


Figura 77: Modello MACSTARS – Sezione km 2+450 – Condizioni statiche
Verifica di stabilità interna sul blocco inferiore

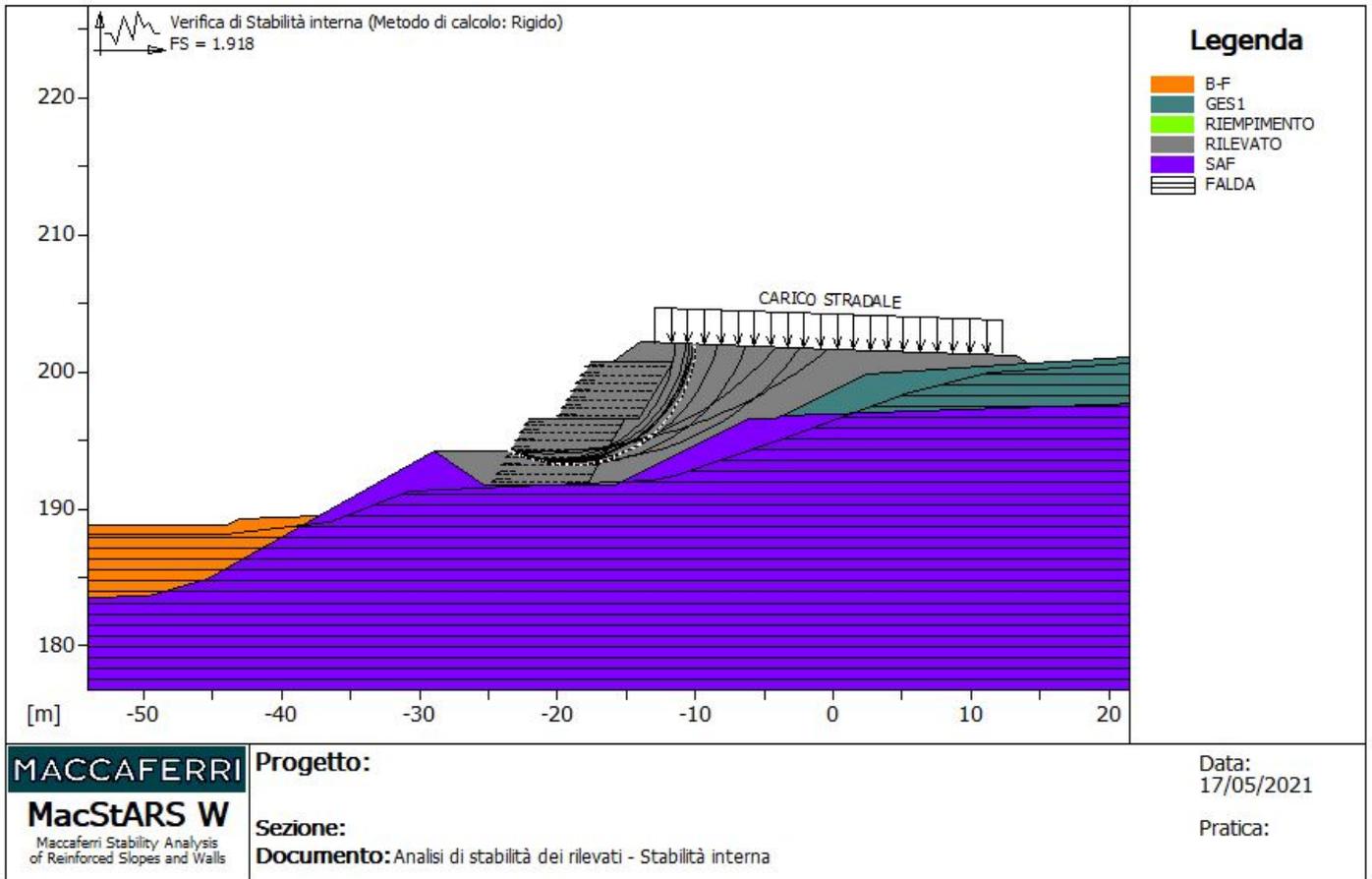


Figura 78: Modello MACSTARS – Sezione km 2+340 – Condizioni sismiche
 Verifica di stabilità interna sul blocco inferiore

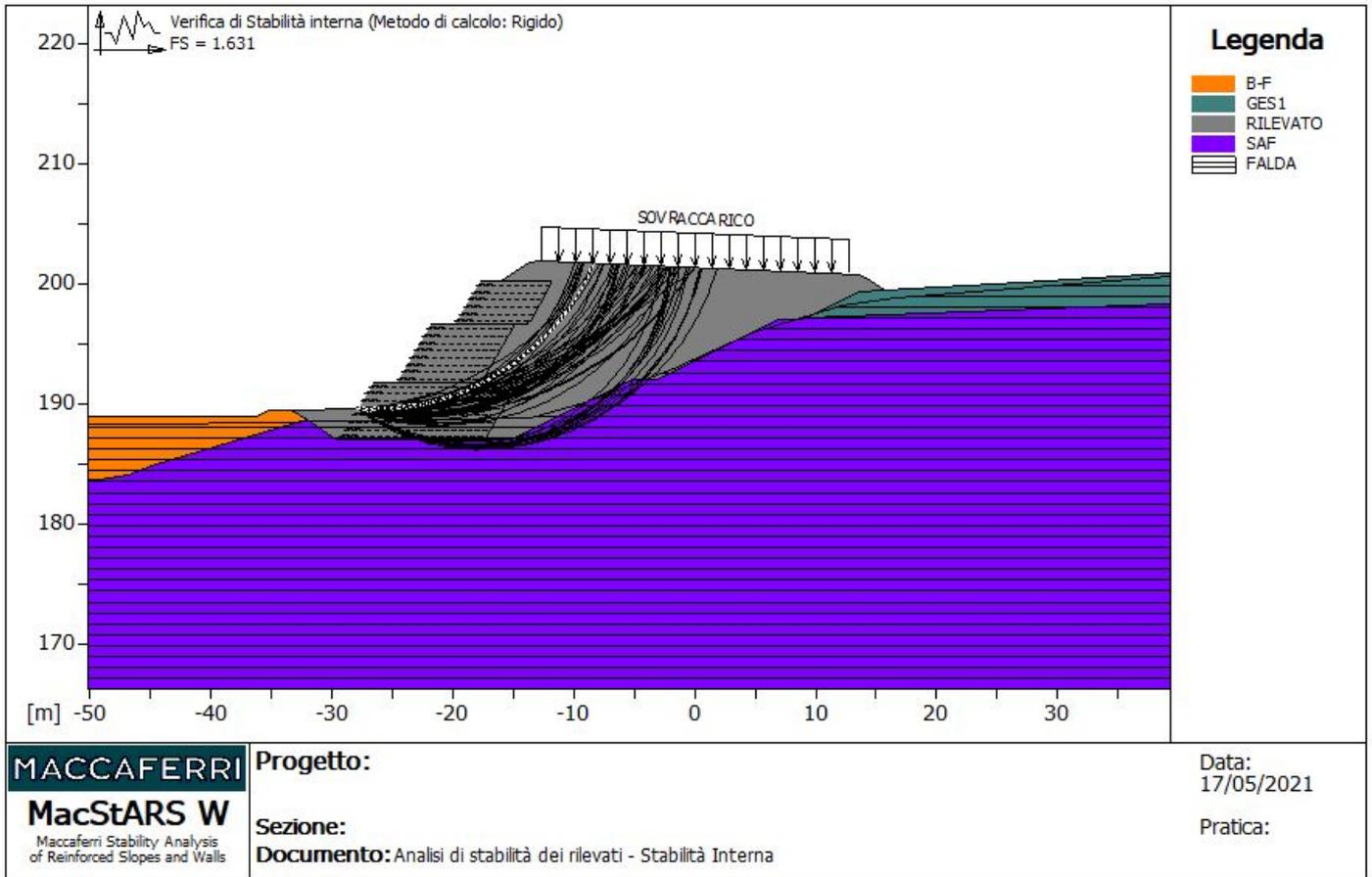


Figura 79: Modello MACSTARS – Sezione km 2+360 – Condizioni sismiche
 Verifica di stabilità interna sul blocco inferiore

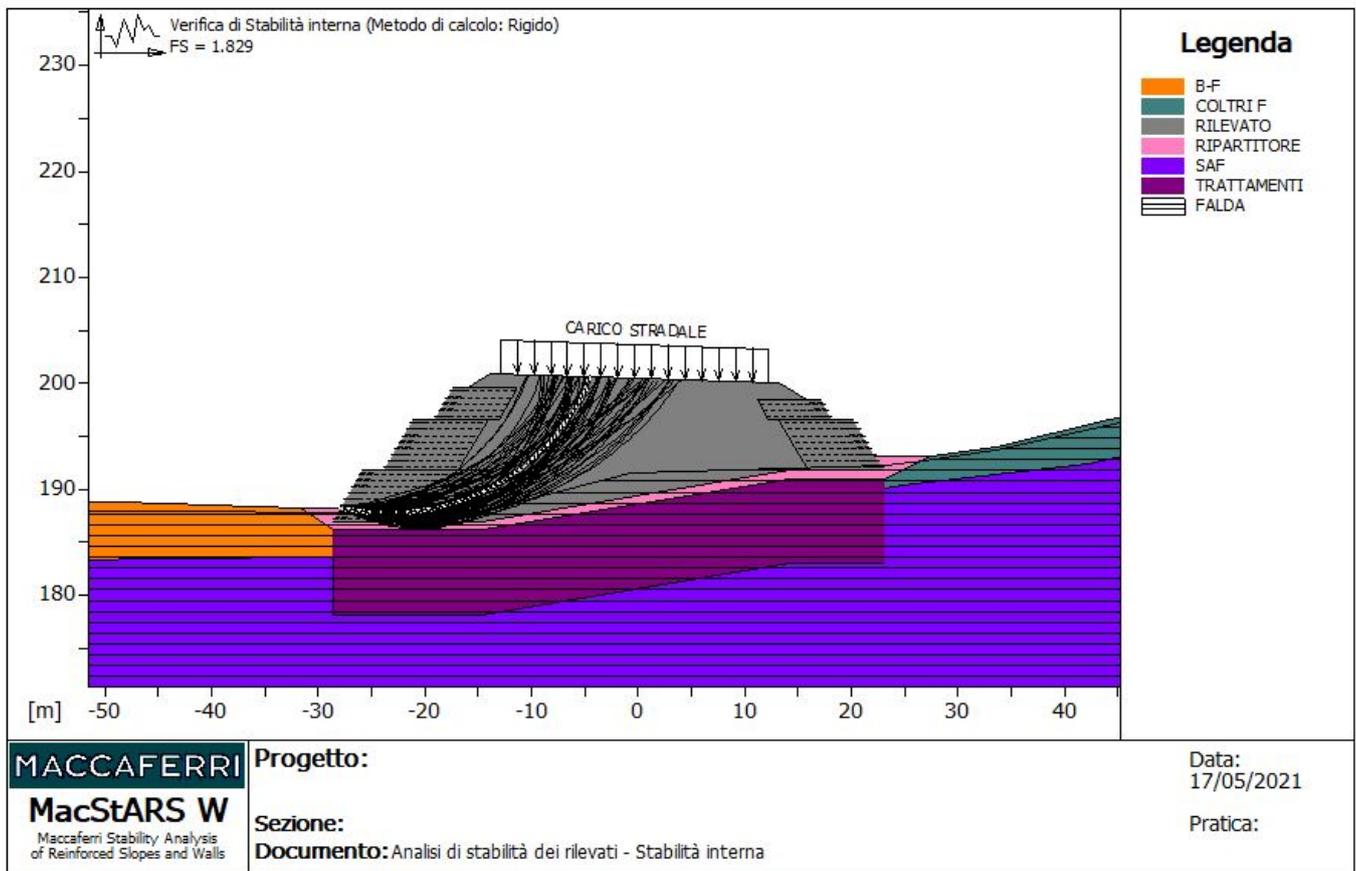


Figura 80: Modello MACSTARS – Sezione km 2+450 – Condizioni sismiche
 Verifica di stabilità interna sul blocco inferiore

12.2.4.3. Stabilità globale

Le verifiche di stabilità globale dell'insieme terra rinforzata e terreno di fondazione risultano sempre soddisfatte in quanto FS è sempre maggiore di 1 in condizioni statiche e 1.2 in condizioni sismiche. I risultati sono riportati nelle figure da Figura 81 a Figura 86.

Per il terreno trattato con inclusioni rigide (sezione al km 2+450) è stata stimata una resistenza equivalente stimata come segue:

- Classe calcestruzzo: C16/20;
- $f_{ck} = 16 \text{ MPa}$;
- $f_{cd} = 16/1.5 = 10.7 \text{ MPa}$;
- $\tau_{max} = 10.7 \cdot 0.85/2 = 4.55 \text{ MPa}$;
- $c_{eq} = \tau_{max} \cdot A_{incl} / A_{tot} = 4550 \cdot 0.28 / 5.3 = 240 \text{ kPa}$;

Dove

- A_{incl} = area della sezione dell'inclusione di diametro 0.6m;
- A_{tot} = area di influenza della singola inclusione con interasse 3.5 m a maglia quinconce.

Tale resistenza equivalente viene comunque fattorizzata nelle analisi di stabilità globale secondo il coefficiente $\gamma_M = 1.25$ da normativa, quindi:

- $c_{eq,k} = 240 \text{ kPa}$;
- $c_{eq,d} = 240/1.25 = 192 \text{ kPa}$;

A tale resistenza viene comunque associato l'angolo di attrito del materiale naturale che non viene influenzato dalla presenza delle colonne.

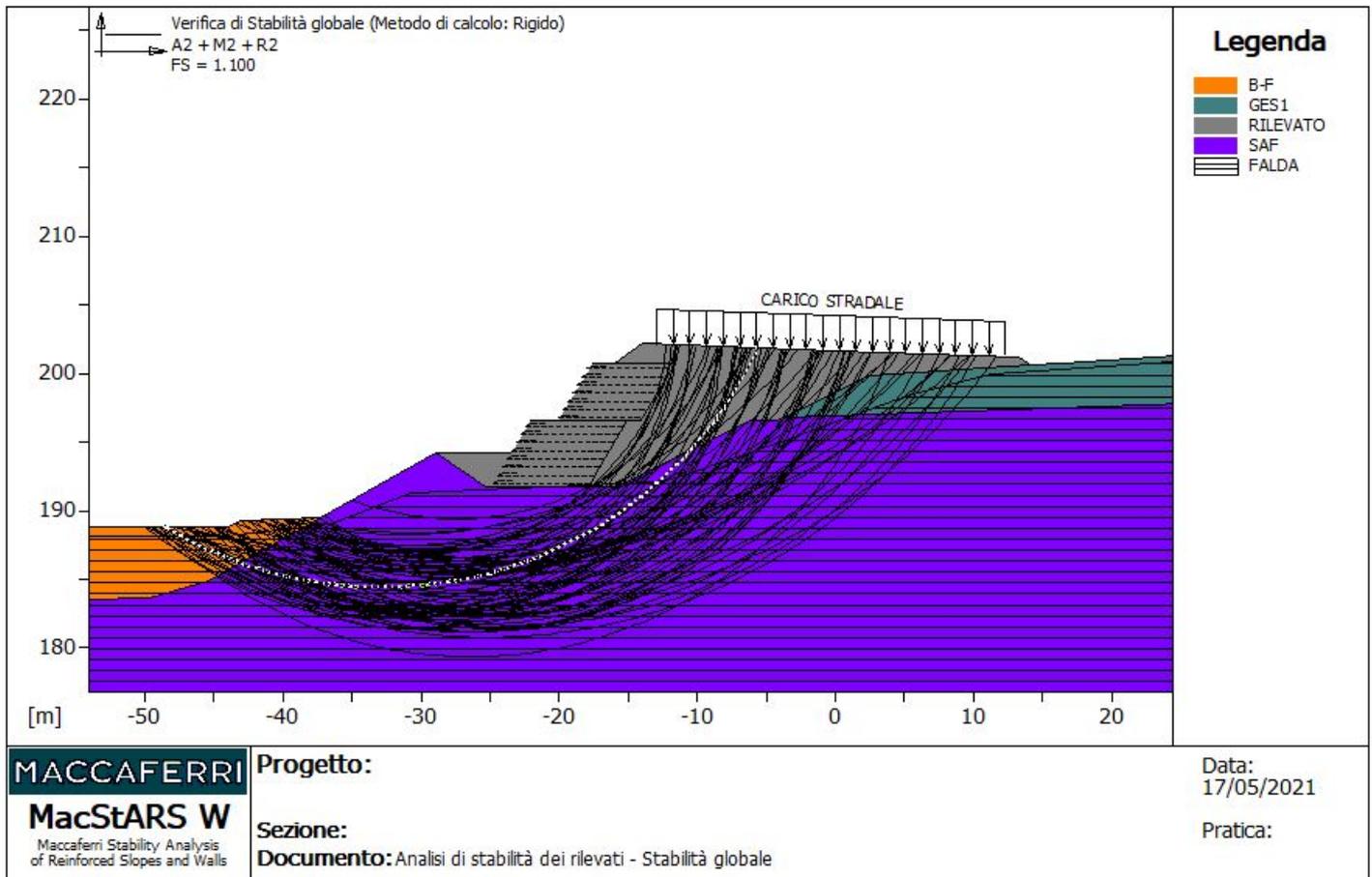


Figura 81: Modello MACSTARS – Sezione km 2+340 – Condizioni statiche
 Verifica di stabilità globale

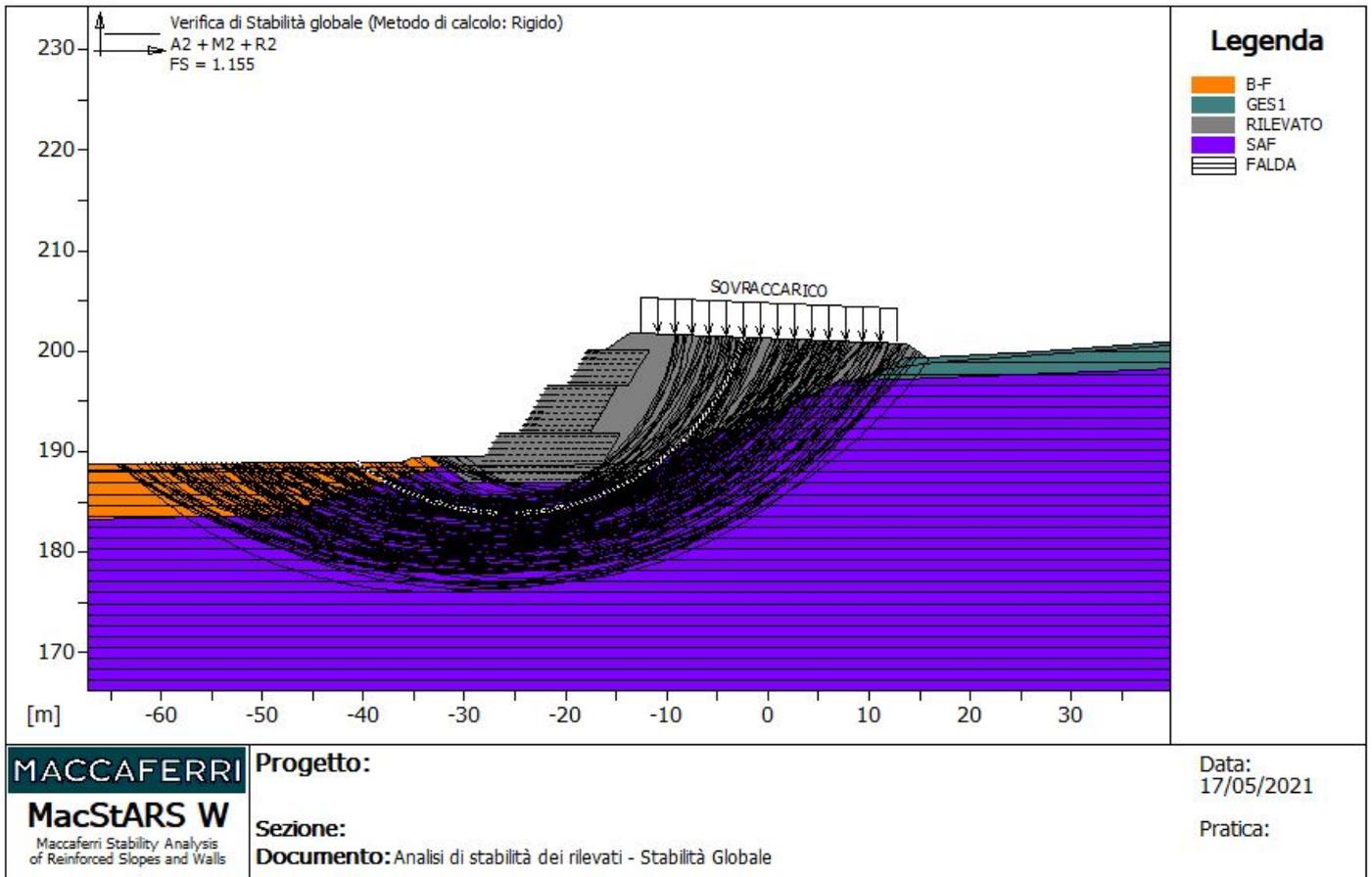


Figura 82: Modello MACSTARS – Sezione km 2+360 – Condizioni statiche
Verifica di stabilità globale

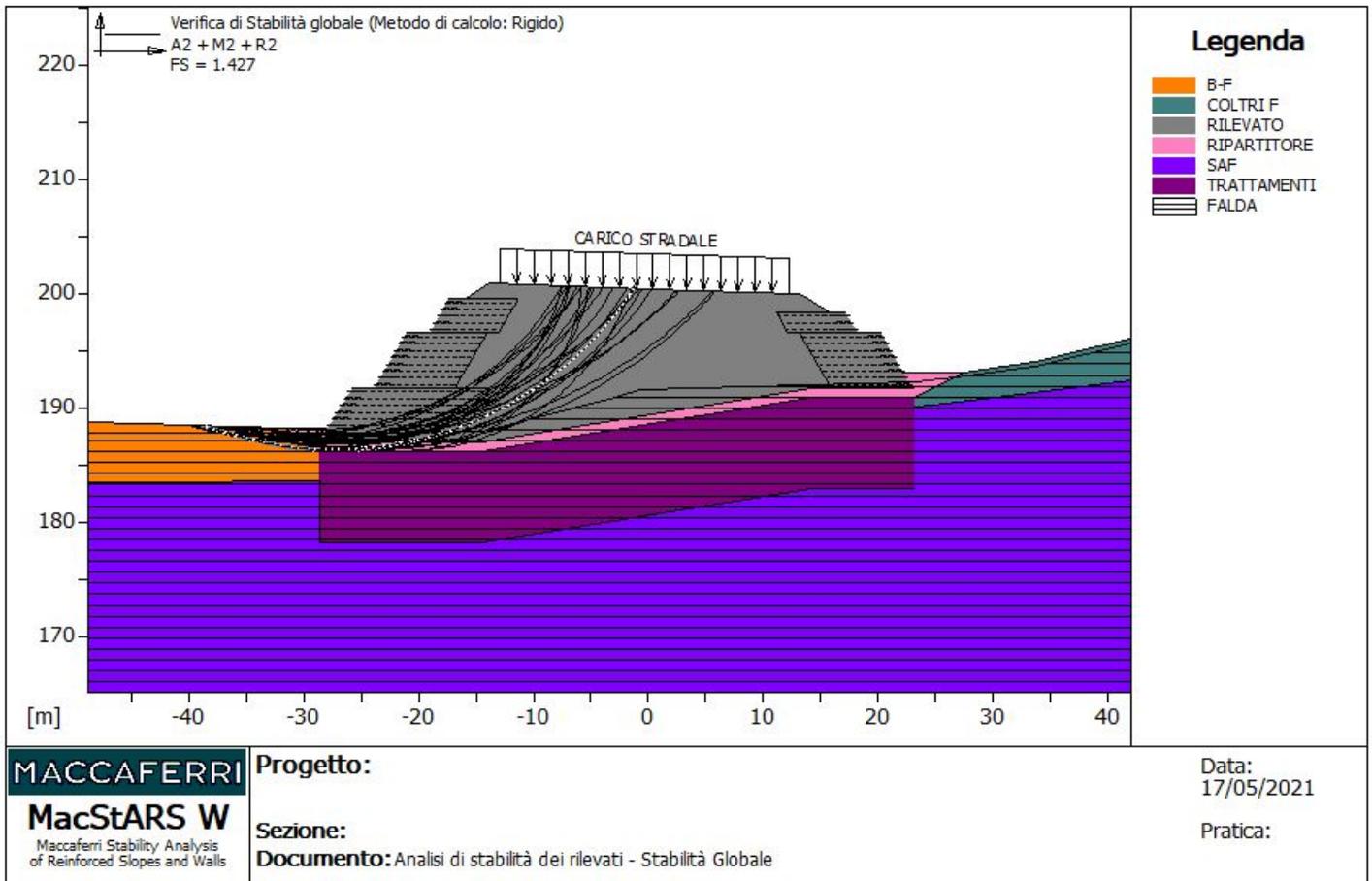


Figura 83: Modello MACSTARS – Sezione km 2+450 – Condizioni statiche
 Verifica di stabilità globale

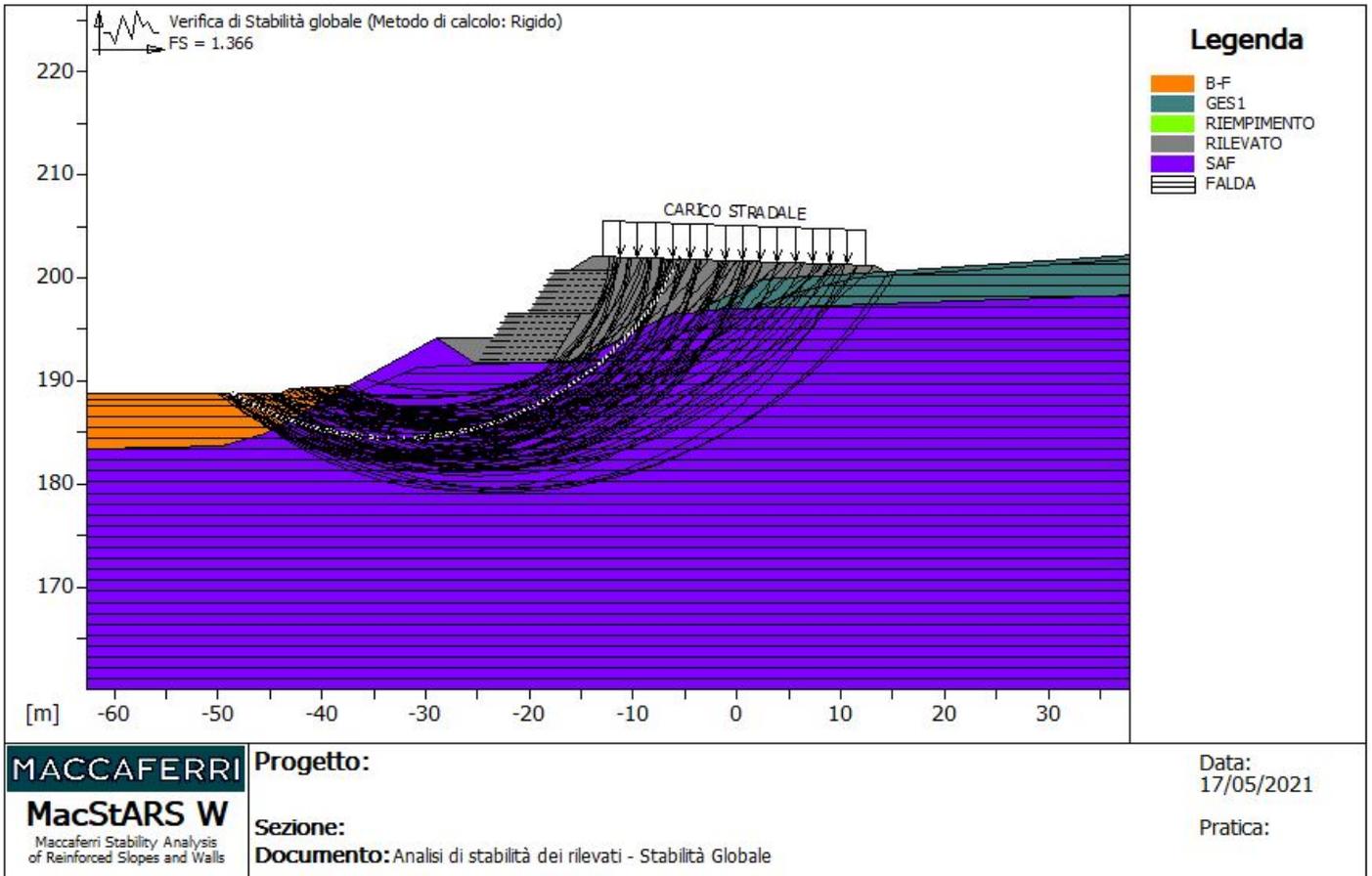


Figura 84: Modello MACSTARS – Sezione km 2+340 – Condizioni sismiche
 Verifica di stabilità globale

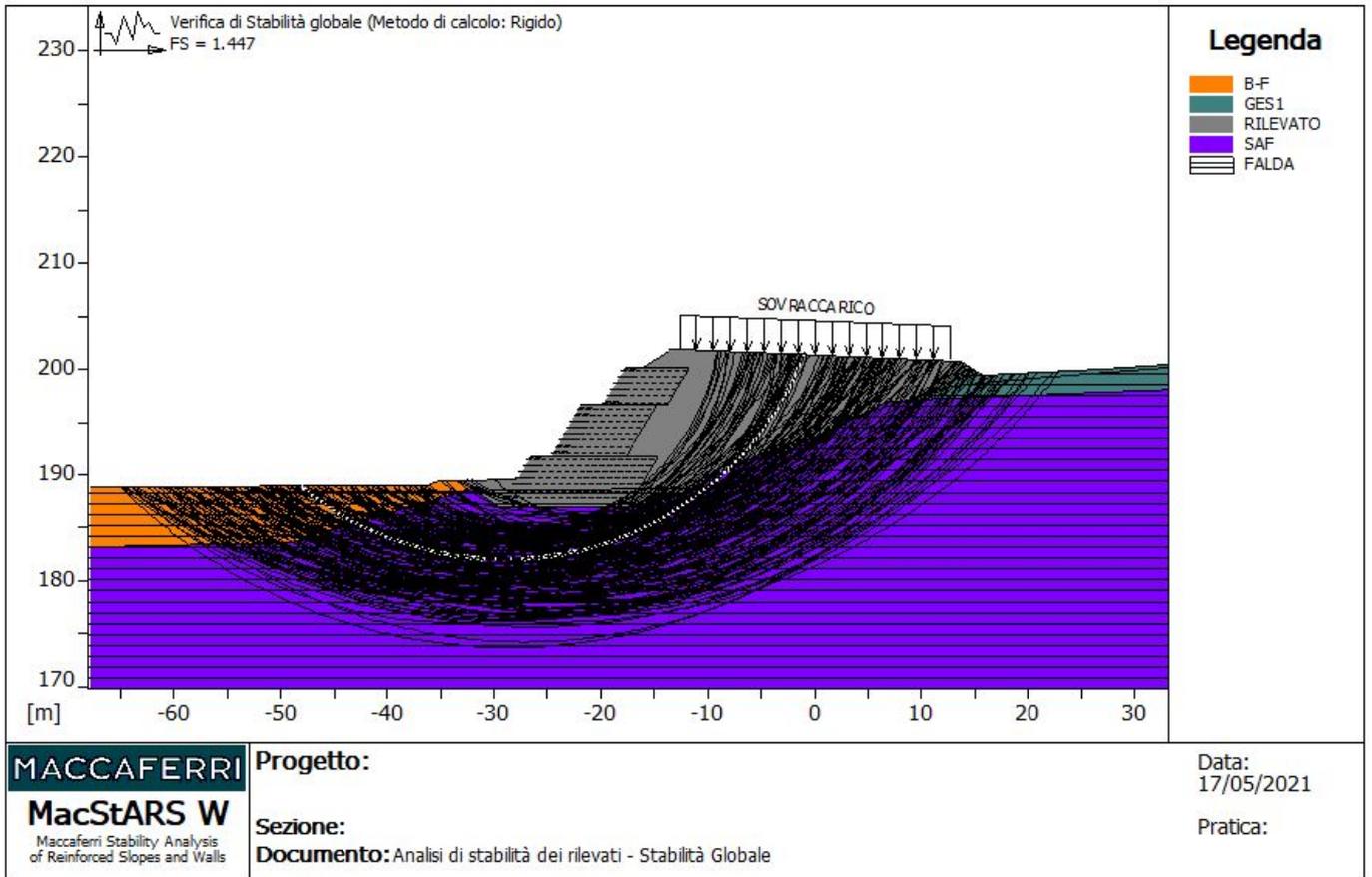


Figura 85: Modello MACSTARS – Sezione km 2+360 – Condizioni sismiche
 Verifica di stabilità globale

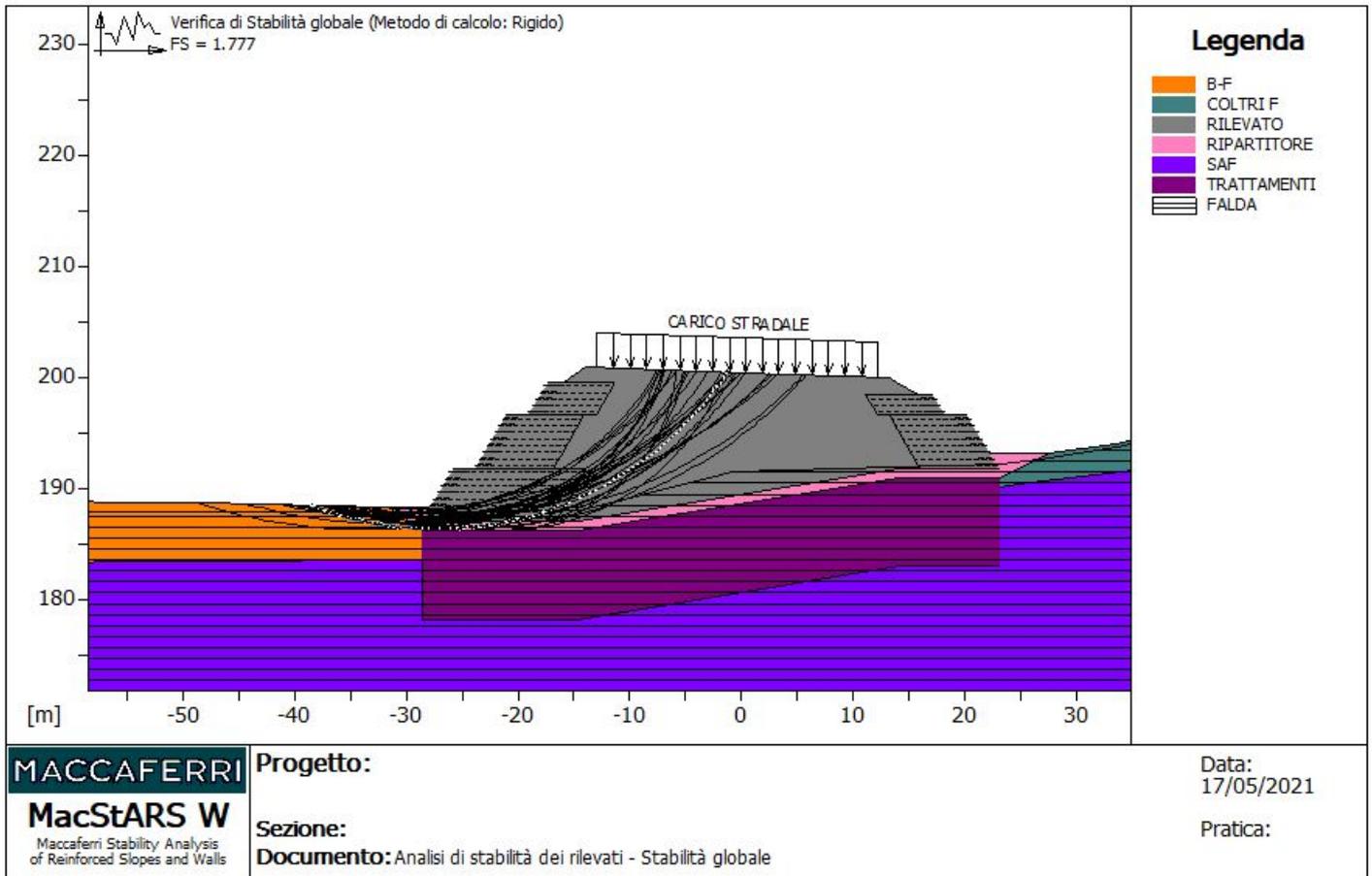


Figura 86: Modello MACSTARS – Sezione km 2+450 – Condizioni sismiche
 Verifica di stabilità globale

12.3. VERIFICHE SLE

12.3.1. Introduzione e descrizione interventi

Per la stima dei cedimenti al di sotto del rilevato, è stato implementato un modello 2D ad elementi finiti tramite il codice di calcolo PLAXIS descritto al paragrafo 6.2.2.

Le analisi sono finalizzate alla stima dei cedimenti attesi nel tempo e alla stima del cedimento residuo definito come la differenza tra il cedimento calcolato nella fase di “messa in esercizio” e i cedimenti attesi a lungo termine, considerando una durata significativa di 50 anni dopo la costruzione del rilevato.

La progettazione e il dimensionamento degli interventi hanno avuto come criterio quello di limitare il cedimento entro limiti accettabili, sia in termini di cedimento totale a lungo termine, che in termini di cedimento residuo dopo il termine dei lavori.

Per il caso particolare si prevedono interventi di miglioramento del terreno come descritto nell'introduzione al capitolo 12, che saranno costituiti da inclusioni rigide ove opportuno. Le analisi sono

svolte per le due sezioni con tre blocchi di terra rinforzata, una senza trattamenti (km 2+360) e l'altra con i trattamenti del terreno di fondazione (km 2+450)

Per quanto riguarda l'analisi dei cedimenti in presenza di inclusioni rigide, la rigidezza equivalente dello strato trattato è stata valutata mediante un ulteriore modello Plaxis assialsimmetrico, dove viene considerato quanto segue:

- Asse di simmetria coincidente con l'asse della singola colonna di trattamento;
- Raggio del modello pari a quello che restituisce un'area pari a quella di influenza di ciascuna colonna;
- Raggio della singola colonna pari a 0.3 m (nel modello viene rappresentata "mezza" colonna);
- Stratigrafia, falda e parametri geotecnici come dichiarati al precedente paragrafo 11.1;
- Strato di ripartizione di spessore 0.8 m a cui vengono assegnati gli stessi parametri geotecnici del bonifico;
- Carico corrispondente al peso del rilevato in asse;

La mesh di calcolo è rappresentata in Figura 87. Il modulo equivalente dello strato trattato viene preso valutato come rapporto tra il carico applicato e la deformazione (rapporto tra cedimento e altezza complessiva dello strato) dello strato compreso tra la testa e la base delle colonne al bordo del modello assialsimmetrico (quindi nel punto intermedio tra le colonne).

I risultati di tale valutazione sono riportati in Figura 88 in termini di contour dei cedimenti del modello e in Tabella 33 in termini di cedimento al bordo del modello nei due punti indicati sopra. Il modulo equivalente risulta quindi $E' = 247 / ((0.517 - 223) / 8) \approx 6700$ kPa.

Tabella 33: Sintesi della valutazione dei cedimenti per la stima del modulo equivalente dello strato trattato

Cedimento a testa strato trattato (base ripartitore)	Cedimento a base strato trattato	Spessore strato trattato
(m)	(m)	(m)
0.517	0.223	8

Output Version 2019.0.0.0

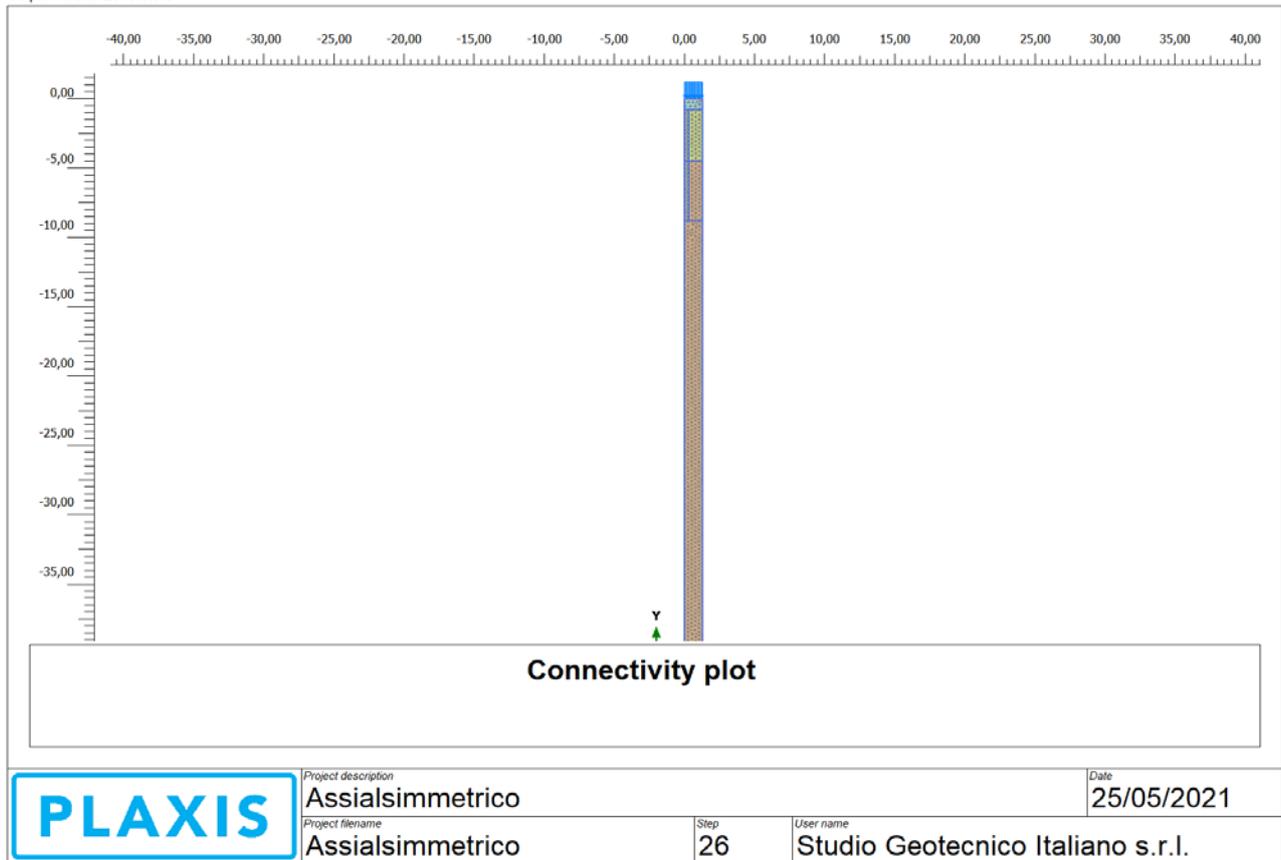


Figura 87 – Modello PLAXIS assialsimmetrico per la valutazione della rigidità equivalente dello strato trattato

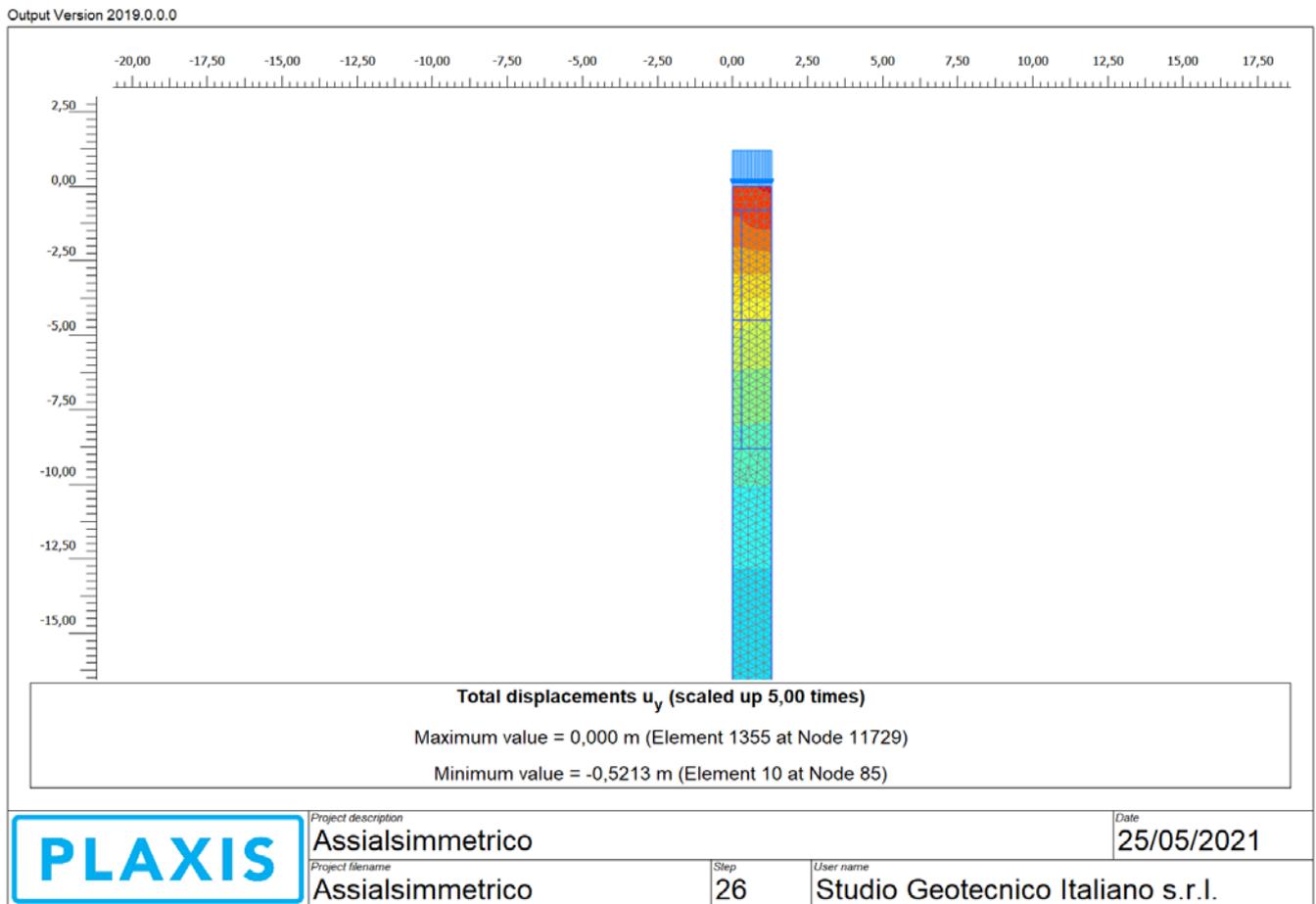


Figura 88 – Modello PLAXIS assialsimmetrico – contour dei cedimenti del modello soggetto al carico del rilevato

12.3.2. Mesh, stratigrafia e falda

La mesh e la stratigrafia per le due sezioni analizzate sono mostrate di seguito in Figura 89 e Figura 90. La stratigrafia è stata presa in sezione facendo riferimento a quanto riportato sul profilo geotecnico e sulle sezioni geotecniche. La falda è stata considerata a livelli “standard”, ovvero a quanto riportato sul profilo geotecnico; la falda si trova ad una profondità variabile tra 1 m e 4 m di profondità da piano campagna.

12.3.3. Modelli costitutivi e parametri geotecnici caratteristici

Per tutti gli strati di terreno naturale si è fatto riferimento ad un modello costitutivo “Soft-Soil”, dove la cedevolezza è governata dai coefficienti di compressibilità in primo carico, in scarico e ricarico e dal grado di sovraconsolidazione, con un modulo corrente quindi variabile in relazione allo stato tensionale corrente. I parametri geotecnici caratteristici utilizzati sono quelli dichiarati in Tabella 8. La permeabilità è stata presa pari a 10^{-8} m/s.

Per i materiali costituenti la bonifica, il ripartitore (caratterizzato per semplicità come il materiale di bonifica) e il rilevato si è invece fatto riferimento ad un modello costitutivo “Mohr-Coulomb”. I parametri

geotecnici caratteristici utilizzati sono quelli dichiarati in Tabella 7, con l'eccezione dell'angolo di attrito caratteristico del materiale di rilevato che è stato preso per questo caso particolare pari a 35°. La permeabilità è stata presa pari a 10^{-4} m/s.

Per lo strato di materiale trattato con inclusioni rigide si è fatto riferimento ad un modello costitutivo "Mohr-Coulomb" con modulo elastico come stimato al precedente paragrafo 12.3.1 e parametri di resistenza equivalenti come stimato al precedente paragrafo 12.2.4.3. La permeabilità è stata presa come quella del terreno naturale, quindi pari a 10^{-8} m/s.

Per i blocchi in terra rinforzata si è fatto riferimento ad un modello costitutivo "Linear-Elastic" con modulo elastico pari a quello del materiale di rilevato.

12.3.4. Carichi

Nelle analisi effettuate per la valutazione dei cedimenti non sono stati considerati sovraccarichi di tipo variabile.

12.3.5. Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono quelle "standard" automaticamente impostate nel codice di calcolo, ovvero spostamenti orizzontali bloccati ai bordi verticali del modello e spostamenti verticali bloccati alla base del modello.

Le condizioni idrauliche al contorno sono quelle "standard" automaticamente impostate nel codice di calcolo, ovvero moto di filtrazione consentito ai bordi verticali ma impedita alla base del modello.

12.3.6. Fasi di calcolo

Le fasi di costruzione simulate nel calcolo sono le seguenti:

1. Generazione dello stato tensionale iniziale con piano campagna attuale;
2. Preparazione dei piani di posa con installazione inclusioni rigide ove necessario;
3. Costruzione del rilevato sino all'altezza di progetto (durata 180 giorni)
4. Attesa 1 anno per la stima dei cedimenti a fine costruzione rilevato, prima della messa in esercizio dell'autostrada;
5. Attesa 50 anni per la stima dei cedimenti a lungo termine.

Le prime due fasi sono state effettuate senza considerare la consolidazione (a "lungo termine"), mentre per le successive la consolidazione è stata considerata assegnando dei tempi compatibili con quelli di costruzione di un rilevato autostradale. I cedimenti sono valutati nel seguito a partire dall'inizio della suddetta fase 3.

12.3.7. Risultati

I risultati delle analisi FEM per la stima dei cedimenti sono riportati nelle figure seguenti, in particolare:

Per la sezione al km 2+360

- In Figura 91 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 4 di cui sopra;
- In Figura 92 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 5 di cui sopra;
- Figura 93 si riporta l'andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3 di cui sopra) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso;

- In Figura 94 si riporta l'andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5 di cui sopra.

Per la sezione al km 2+450

- In Figura 95 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 4 di cui sopra;
- In Figura 96 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 5 di cui sopra;
- In Figura 97 si riporta l'andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3 di cui sopra) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso;
- In Figura 98 si riporta uno zoom dell'andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3 di cui sopra) fino a 1.5 anni dalla fine della costruzione per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso;
- In Figura 99 si riporta l'andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5 di cui sopra.

In Tabella 34 si riportano i cedimenti stimati per un punto in asse al rilevato, alla base dello stesso (derivati da Figura 94 e Figura 98) alla fine della costruzione dell'opera (prima della messa in esercizio, fine della fase 4 di cui sopra) e a "lungo termine" (fine della fase 5 di cui sopra). Nella stessa tabella si riporta il valore del cedimento residuo a "lungo termine" pari alla differenza fra i due precedenti.

Con riferimento ai risultati ottenuti sia in termini di valore assoluto (da inizio costruzione rilevato) che residuo dopo la messa in esercizio dell'opera, si ritiene che i valori di cedimento stimati siano compatibili con la funzionalità dell'opera, perlomeno nella zona del Rilevato 6.

Per quanto riguarda il Rilevato 7, dato che a causa dell'ingombro e dell'altezza notevoli i cedimenti residui possono risultare un po' più elevati rispetto a tutti gli altri casi analizzati in questo documento, si raccomanda di anticipare il più possibile la costruzione di tale rilevato (lasciando un'opportuna distanza libera tra il rilevato e la spalla, indicativamente 15 m), in modo che i tempi per arrivare alla messa in esercizio siano più lunghi e possa essere scontata la maggior quota parte possibile di cedimento prima della messa in esercizio stessa (si vedano Figura 97 e Figura 98 per maggior dettaglio). Il rilevato sarà da costruire prima della spalla del viadotto così da minimizzare poi i cedimenti differenziali una volta che l'opera sarà messa in esercizio. Si raccomanda anche di tenere in conto che entro i primi 3-5 anni dalla messa in esercizio possa rendersi necessario un intervento di manutenzione straordinaria del manto stradale.

I cedimenti che si verificano all'interno del corpo del rilevato sono dell'ordine di massimo 6 cm (vedi Figura 93 e Figura 97) e possono essere "recuperati" durante la costruzione del rilevato stesso.

Tabella 34: Sintesi sulla valutazione dei cedimenti

Sezione di calcolo	Cedimento a base rilevato, in asse rilevato prima della messa in esercizio (cm)	Cedimento a base rilevato, in asse rilevato a lungo termine (cm)	Cedimento residuo (cm)
RIL06 (km 2+360)	16.4	20.9	4.5
RIL07 (km 2+450)	41.7	48.9	7.2

Output Version 2019.0.0.0

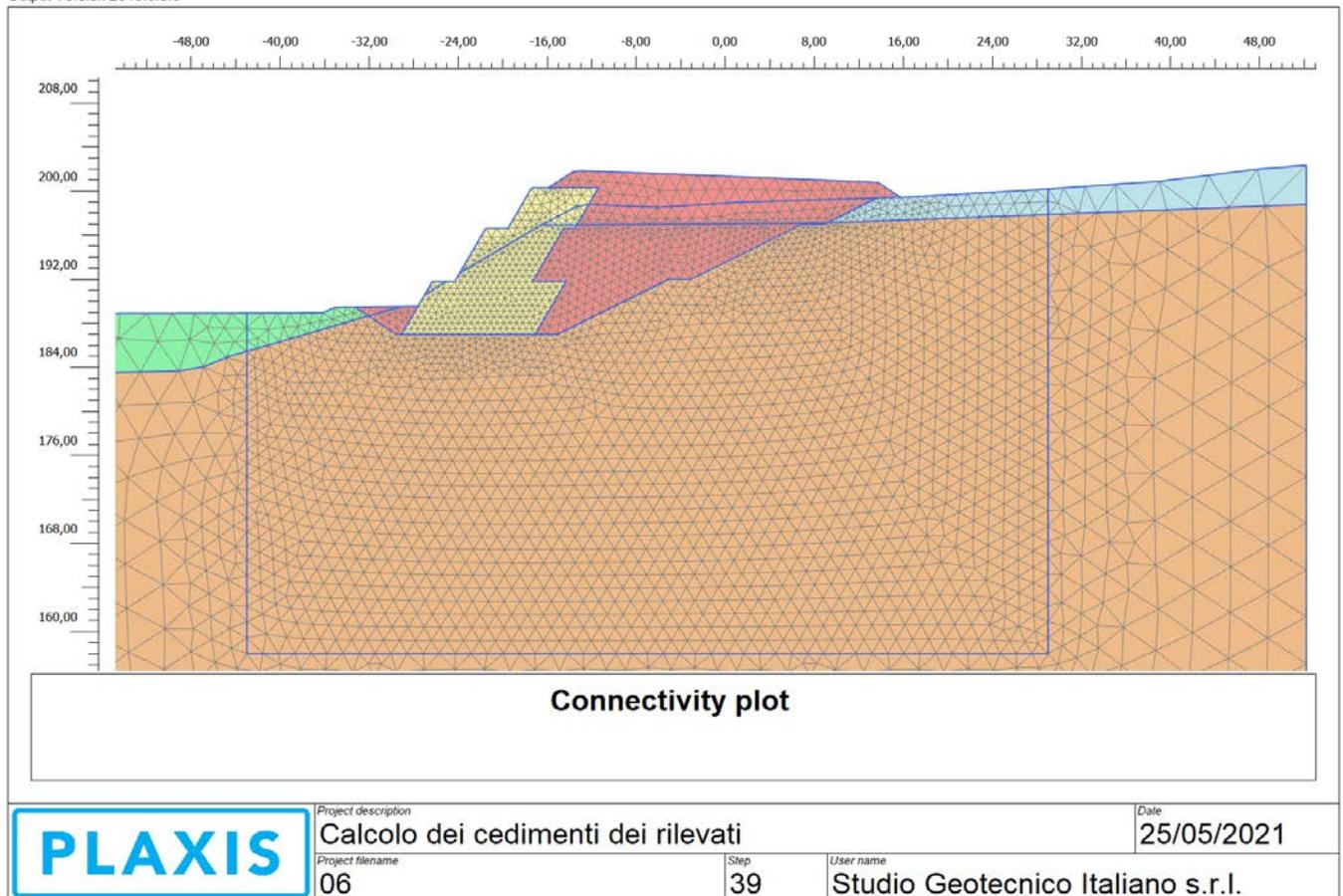


Figura 89 – Modello PLAXIS (con interventi) – Sezione km 2+360

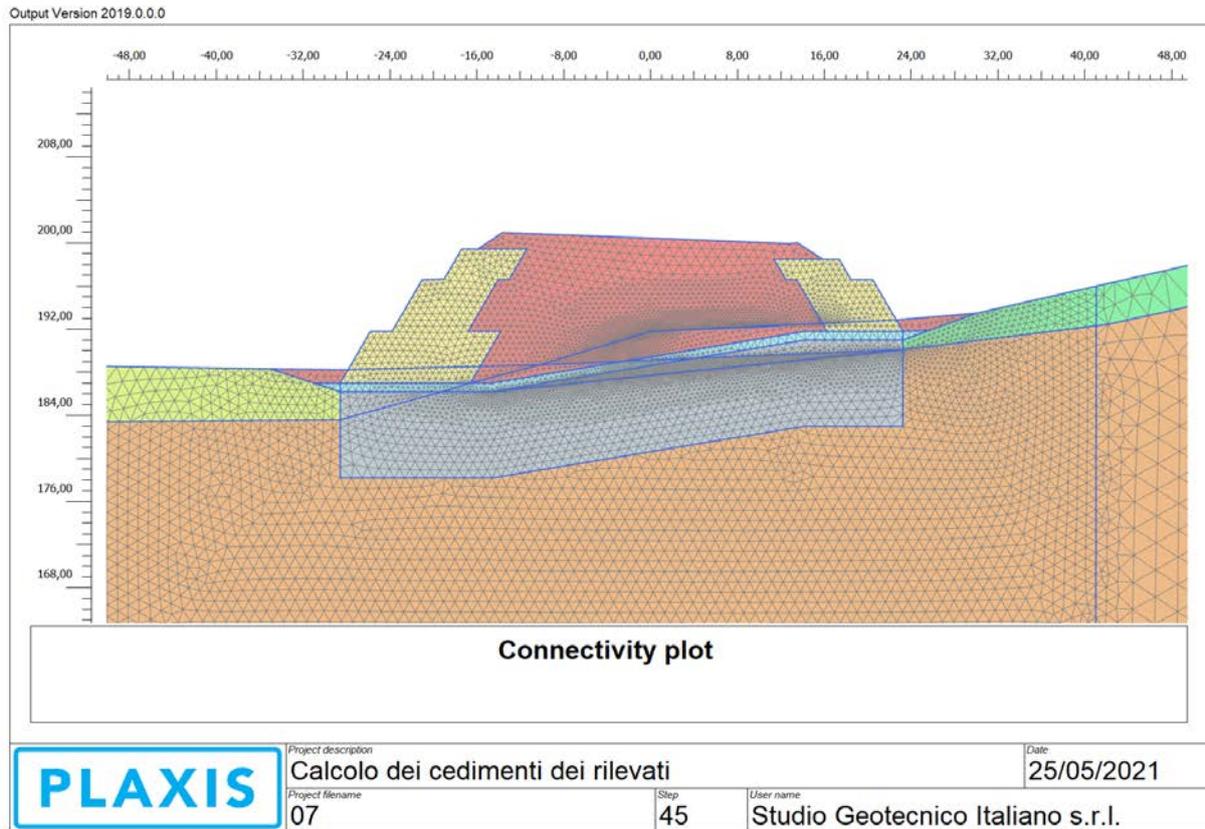


Figura 90 – Modello PLAXIS (con interventi) – Sezione km 2+450

Output Version 2019.0.0.0

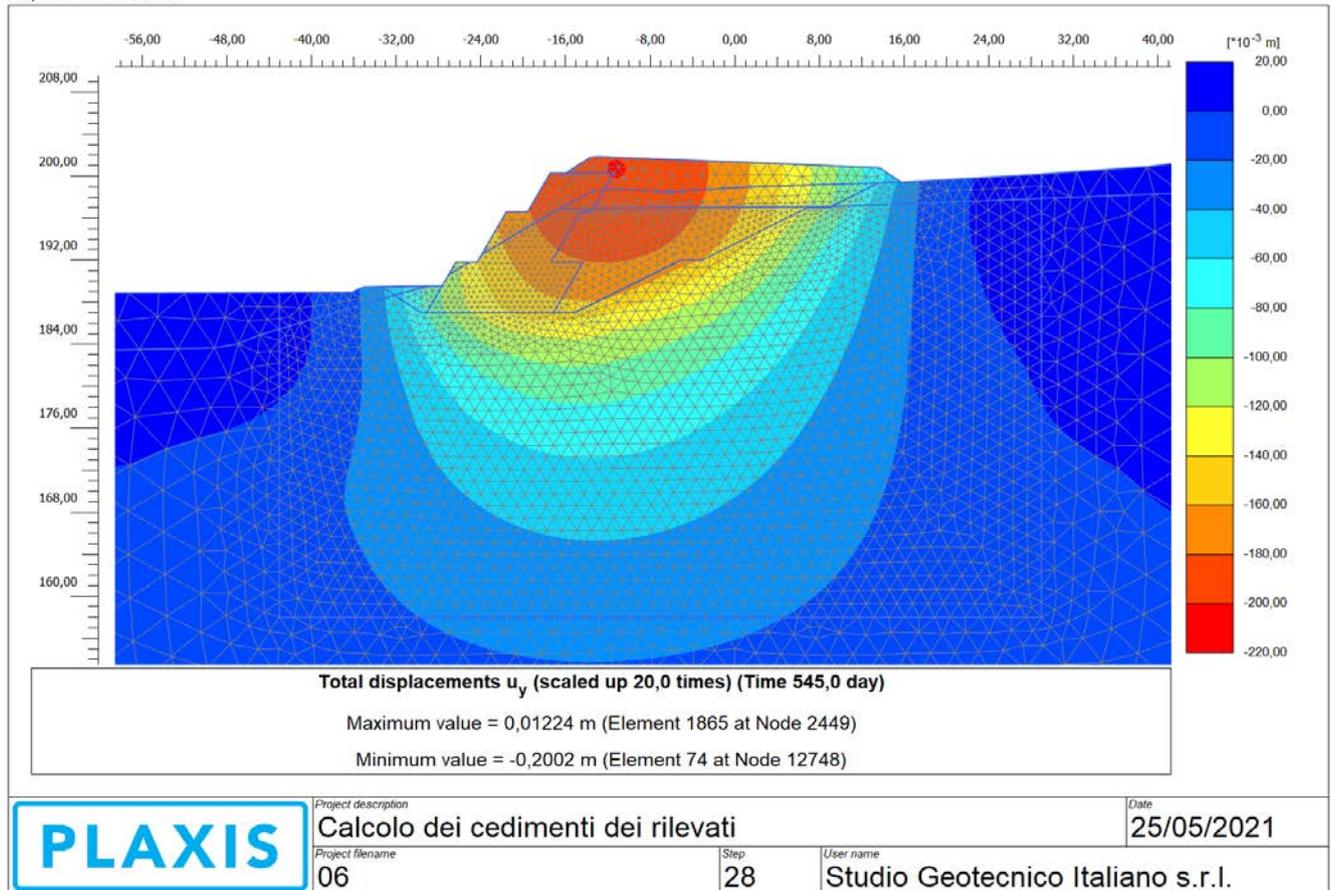


Figura 91: Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+360 – cedimenti del modello a fine fase 4

Output Version 2019.0.0.0

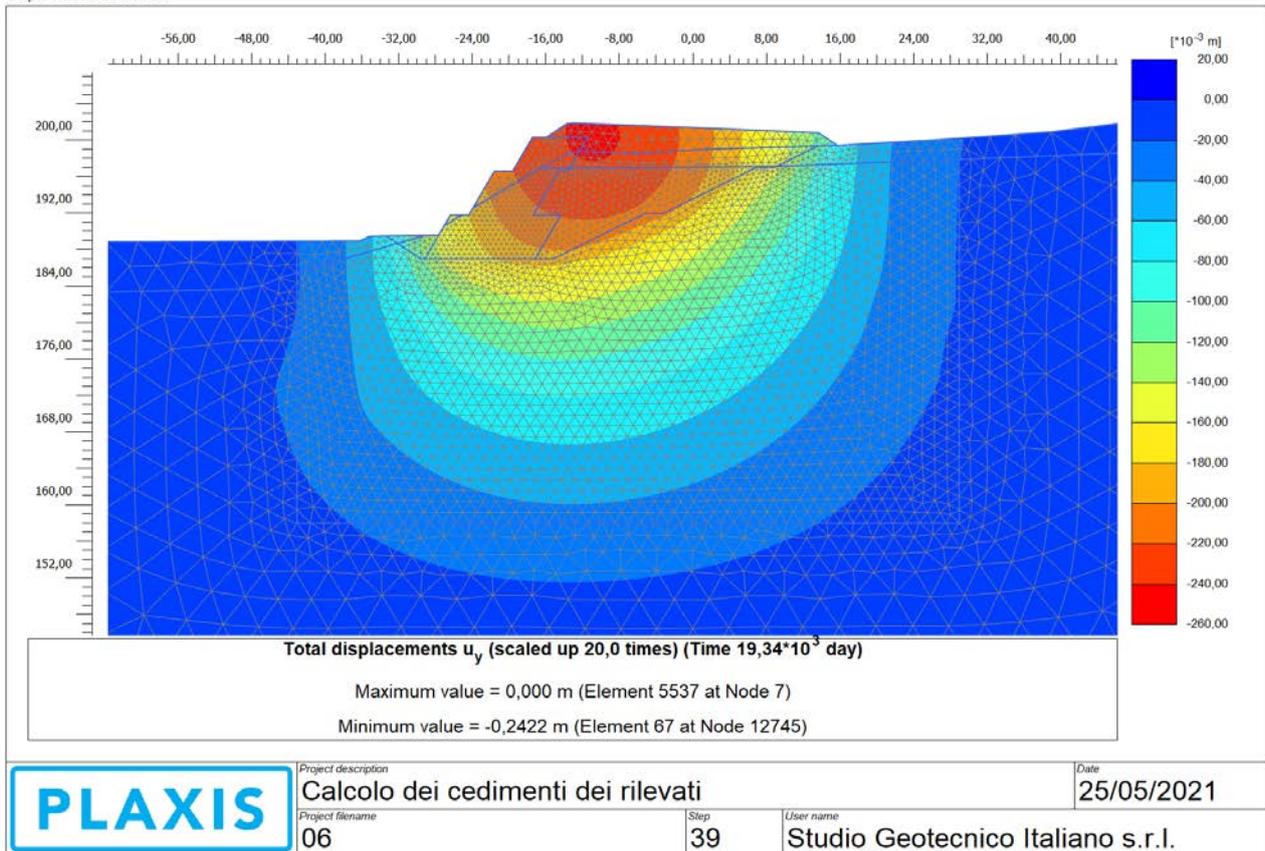


Figura 92 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+360 – cedimenti del modello a fine fase 5

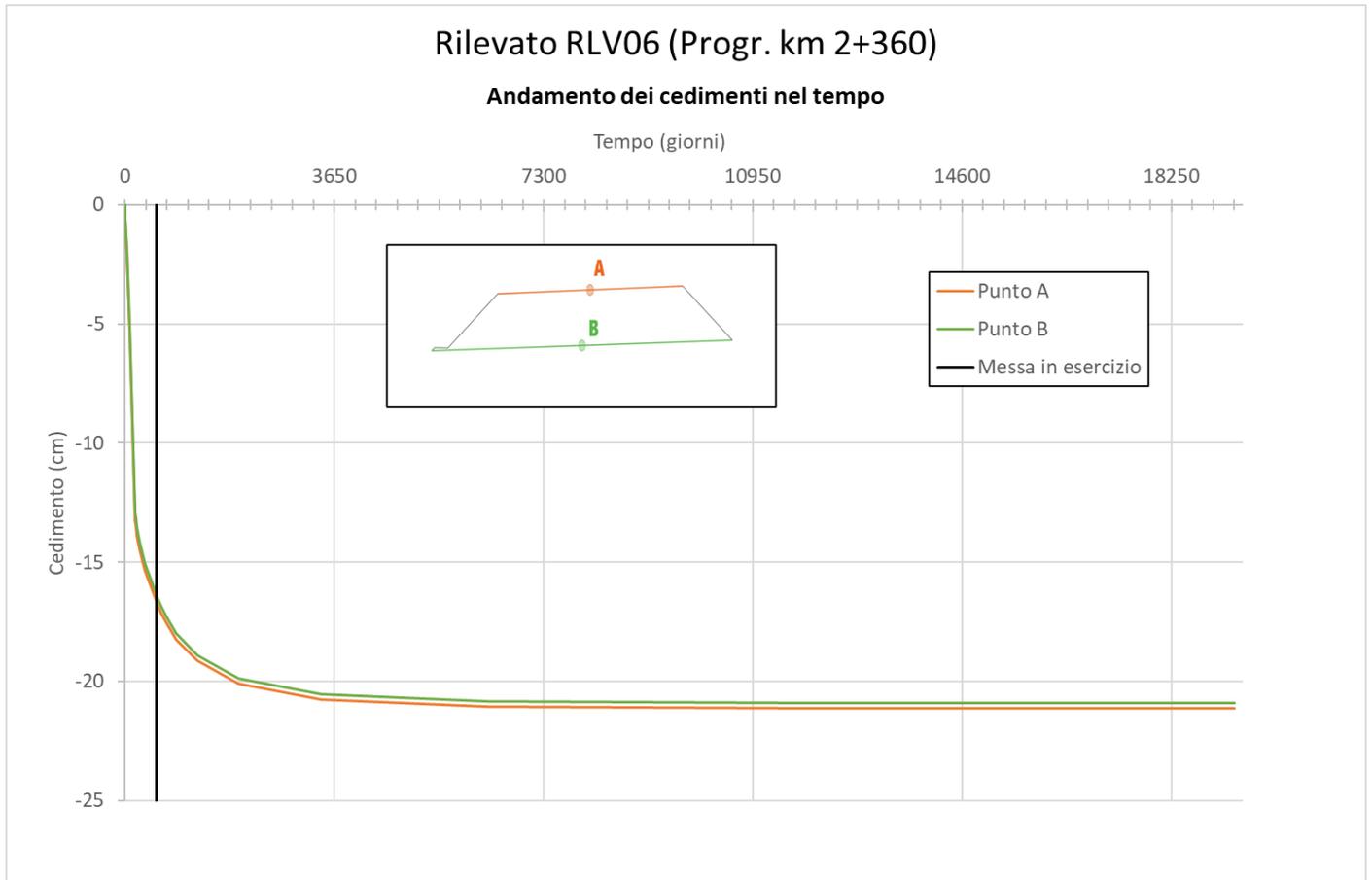


Figura 93 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+360 – andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso

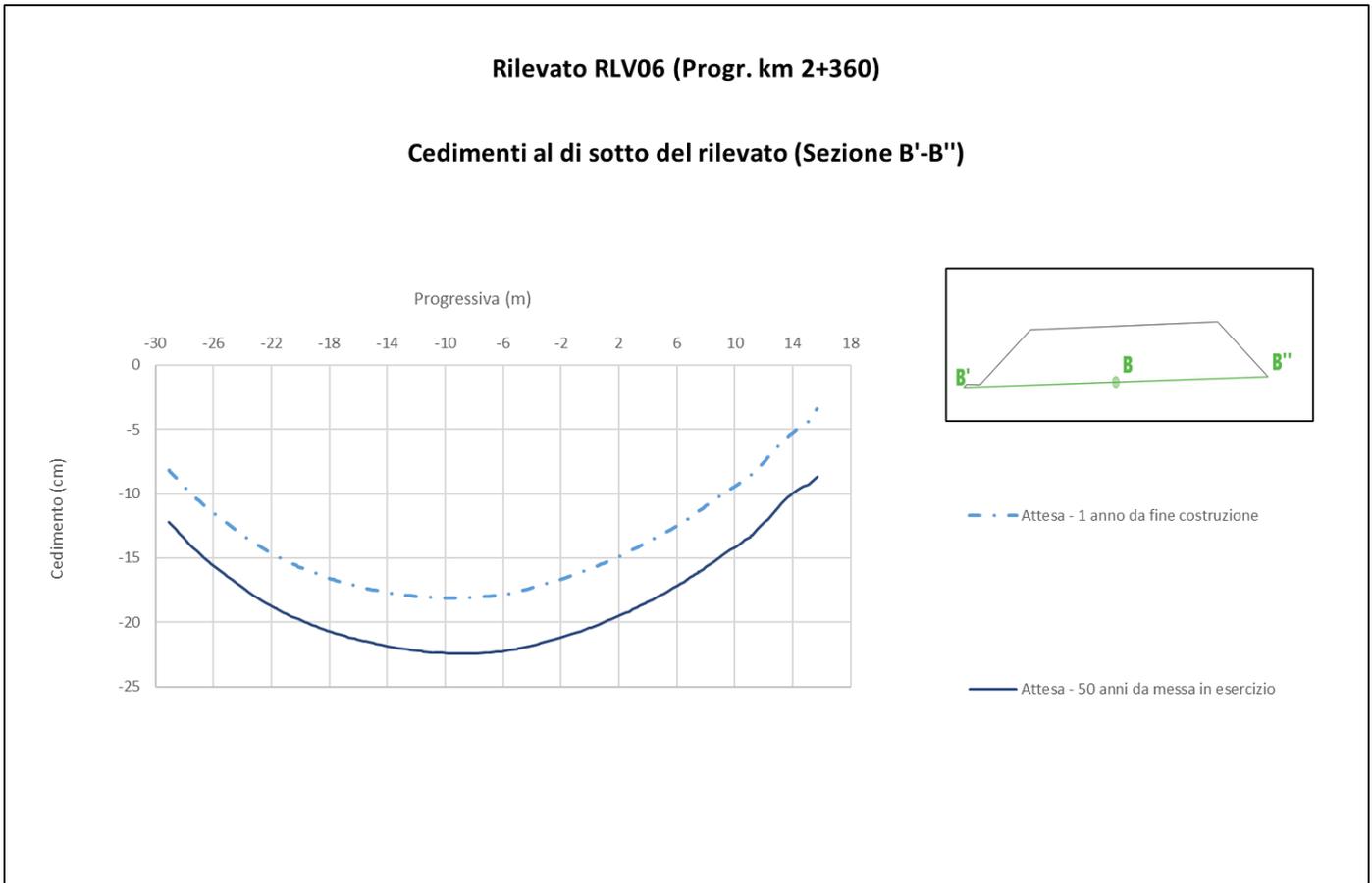


Figura 94 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+360 – andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5

Output Version 2019.0.0.0

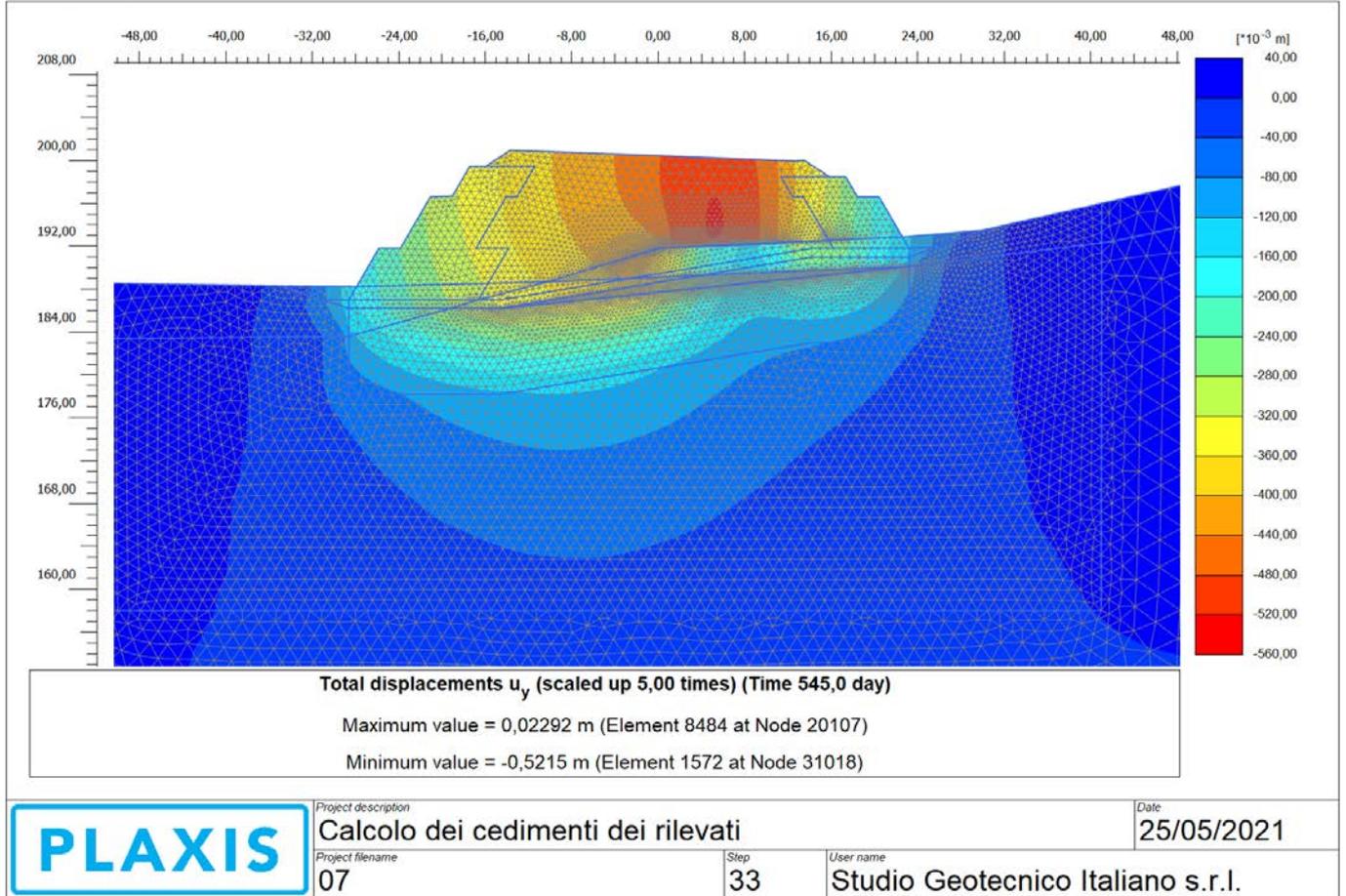


Figura 95: Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+450 – cedimenti del modello a fine fase 4

Output Version 2019.0.0.0

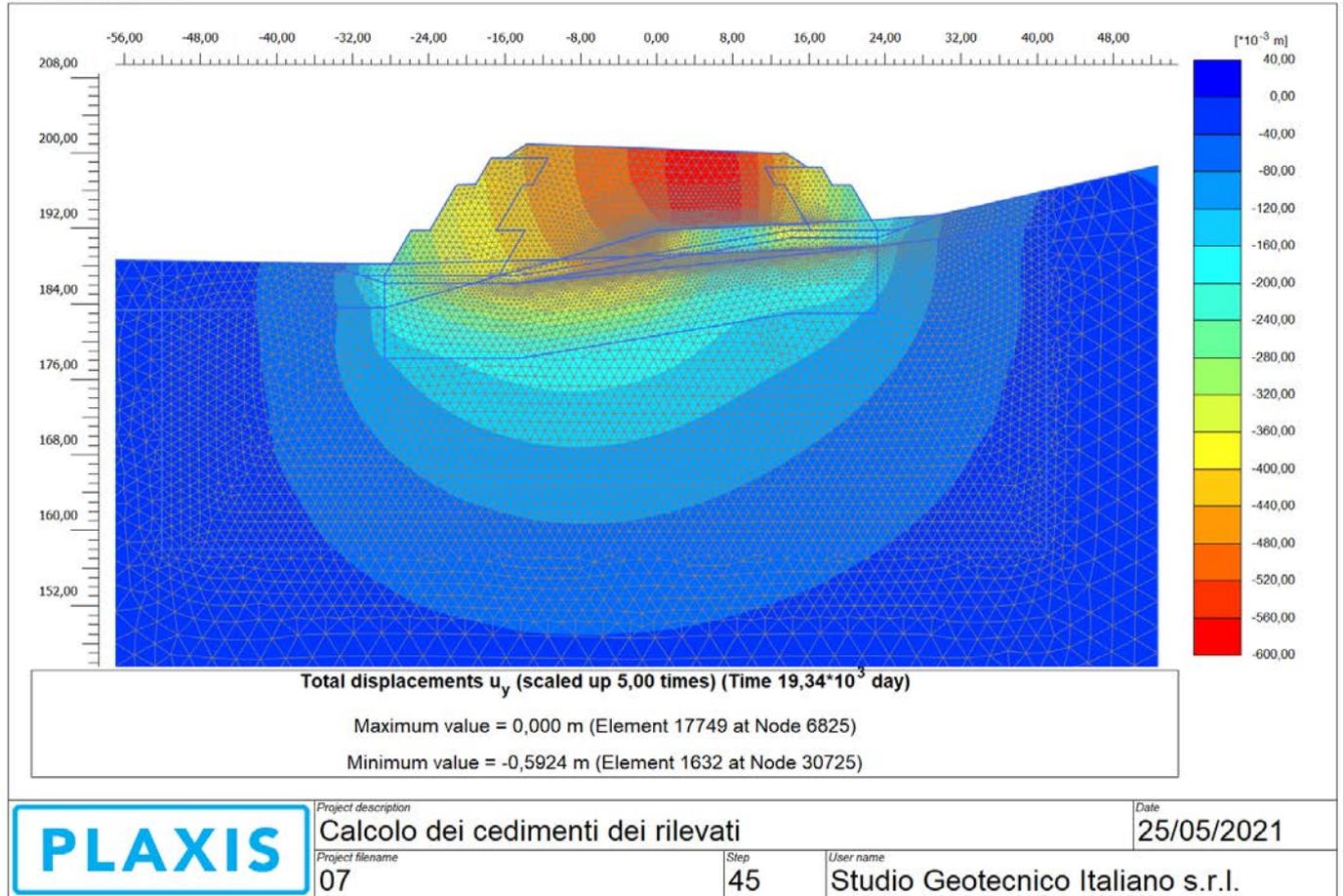


Figura 96 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+450 – cedimenti del modello a fine fase 5

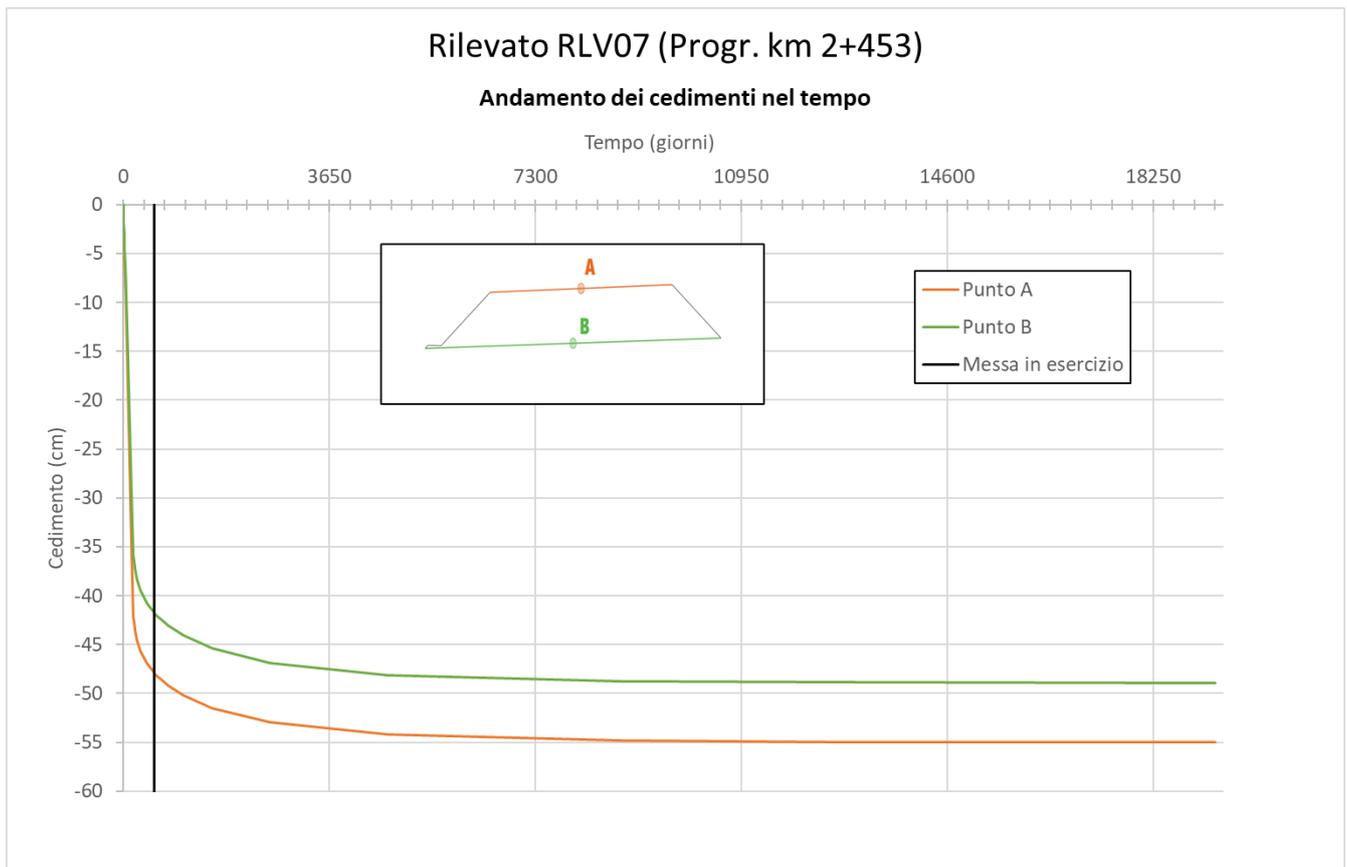


Figura 97 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+450 – andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso

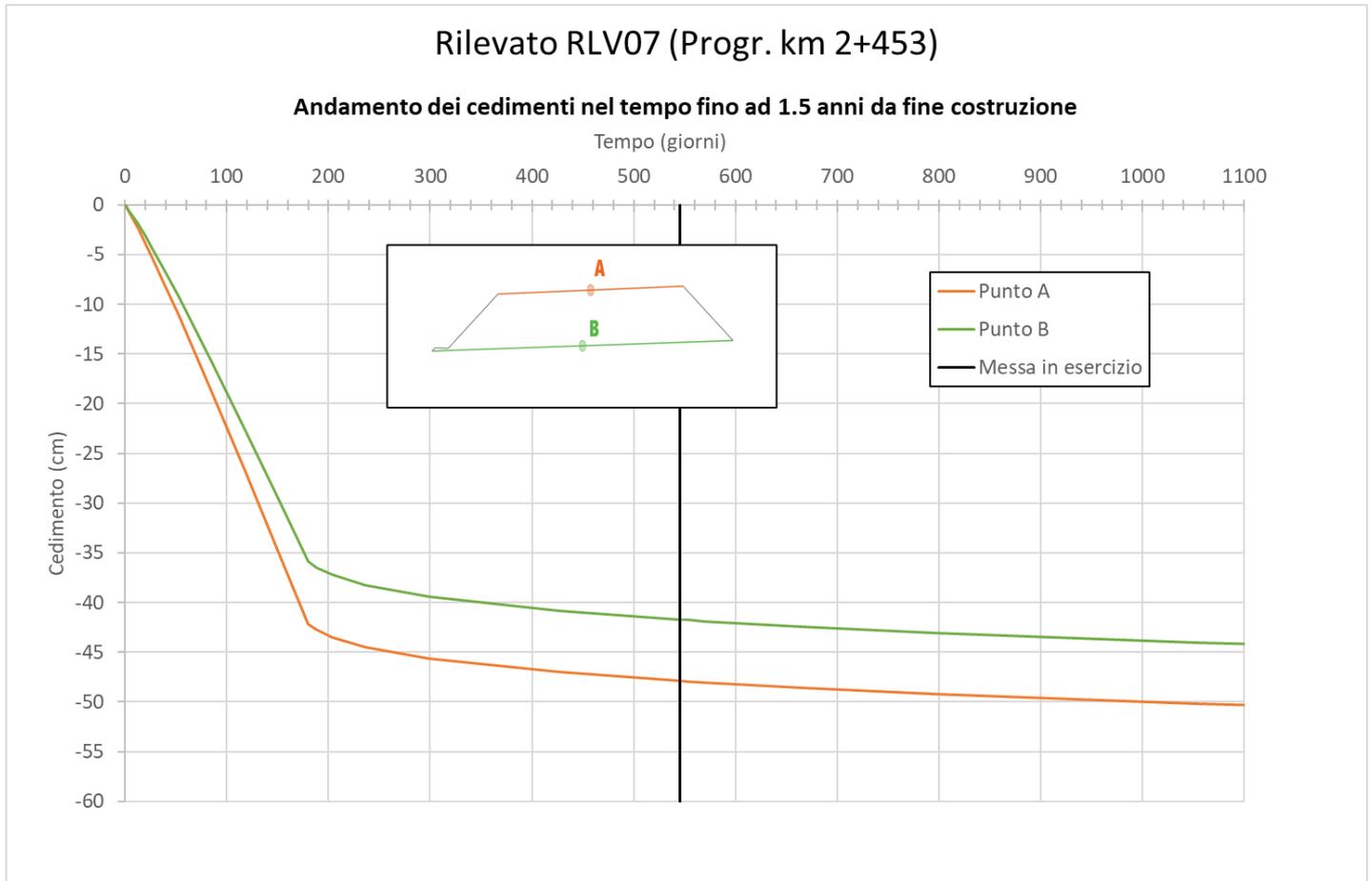


Figura 98 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+450 – andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso – zoom nei primi tre anni da inizio costruzione

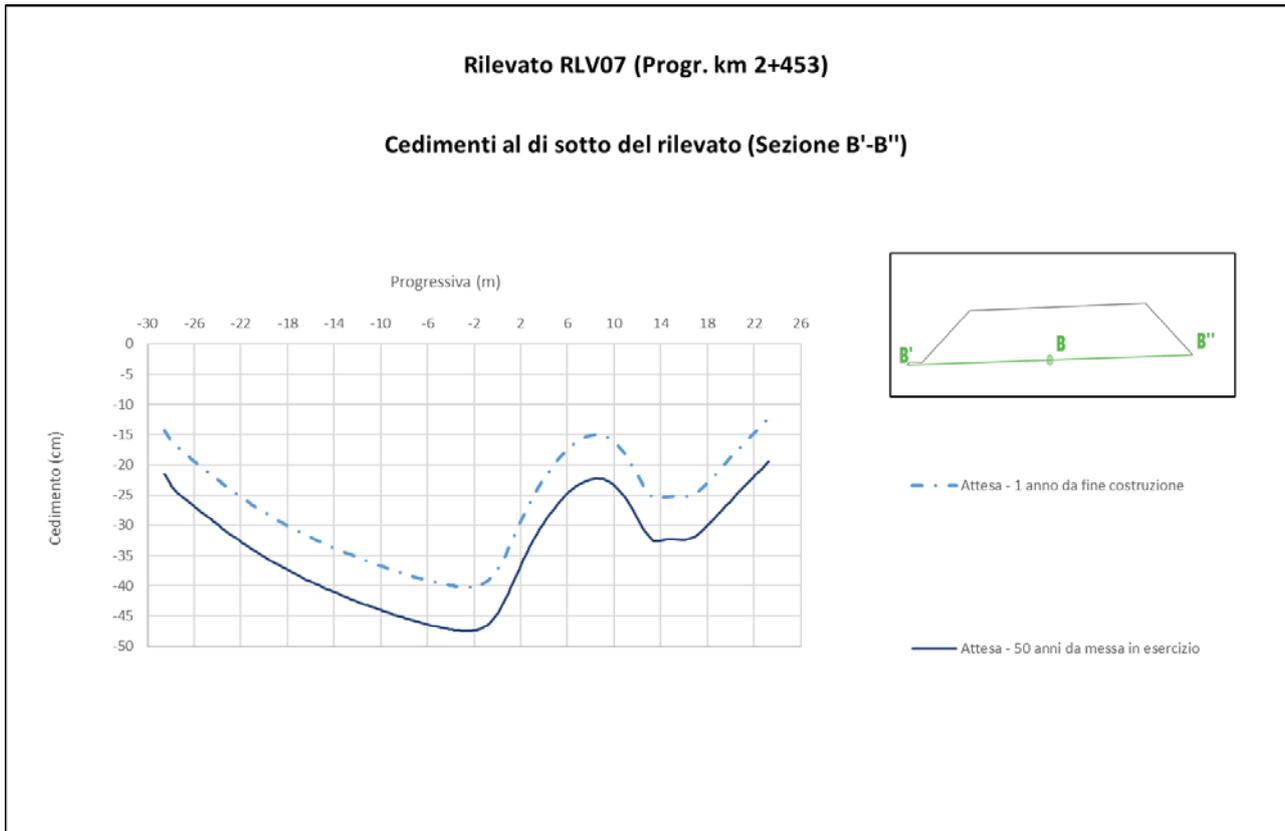


Figura 99 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+450 – andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5

13. RLV08

Oggetto di questo capitolo è il rilevato identificato con come “RLV08” relativo alla tratta autostradale compresa tra il km 2+861 e il km 3+210 (vedi Tabella 6).

In questa zona, sulla base di quanto indicato negli elaborati di geologia, sono presenti depositi alluvionali del Tanaro per spessori dell’ordine di 5-6 m al di sopra della formazione di base delle argille marnose di S. Agata. Dato che le alluvioni, soprattutto nella porzione precedente all’attraversamento del canale ENEL sono prevalentemente costituite da materiali a grana fine poco consistenti, si prevede di intervenire o con bonifica o con trattamento colonnare a seconda dell’altezza del rilevato.

A tal proposito, per geometrizzare correttamente i limiti dei vari interventi, sono state analizzate due sezioni; una che corrisponde al km 2+875 dove il rilevato è più alto, l’altra che corrisponde al km 3+100 dove il rilevato è sufficientemente basso da non richiedere sostanzialmente più la berma intermedia, o quantomeno richiederla in minima parte su un solo lato (vedi Figura 100 e Figura 101).

L’intervento nella zona dove il rilevato presenta la berma intermedia consisterà nell’installazione di inclusioni rigide costituite da pali CFA non armati D600mm, L 8 m, a interasse 3.5 m su maglia quinconce. Tra la testa delle inclusioni e la base del rilevato sarà interposto uno strato di ripartizione in ghiaia ben compattata di spessore 0.8m.

L’intervento nella zona dove il rilevato è più basso (tale da non necessitare la berma intermedia) consisterà nella bonifica del materiale in sito con materiale granulare selezionato e compattato per uno spessore pari a 1.0 m.

Entrambi gli interventi si rendono necessari in funzione di garantire i requisiti minimi di normativa nei confronti della stabilità del rilevato.

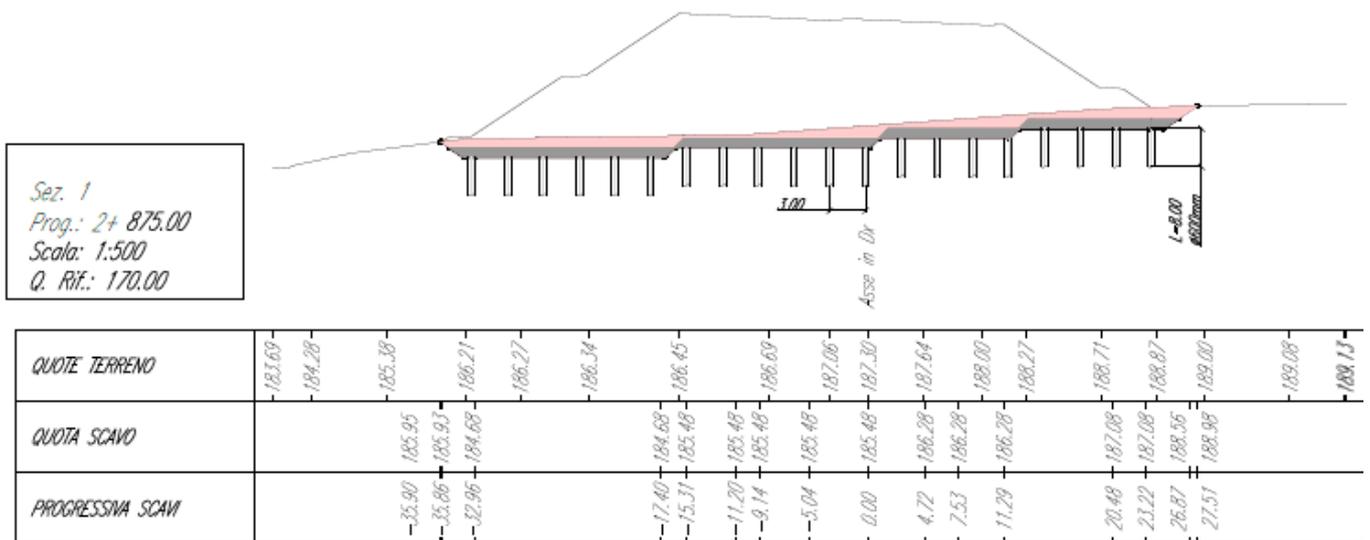


Figura 100: Sezione al km 2+875

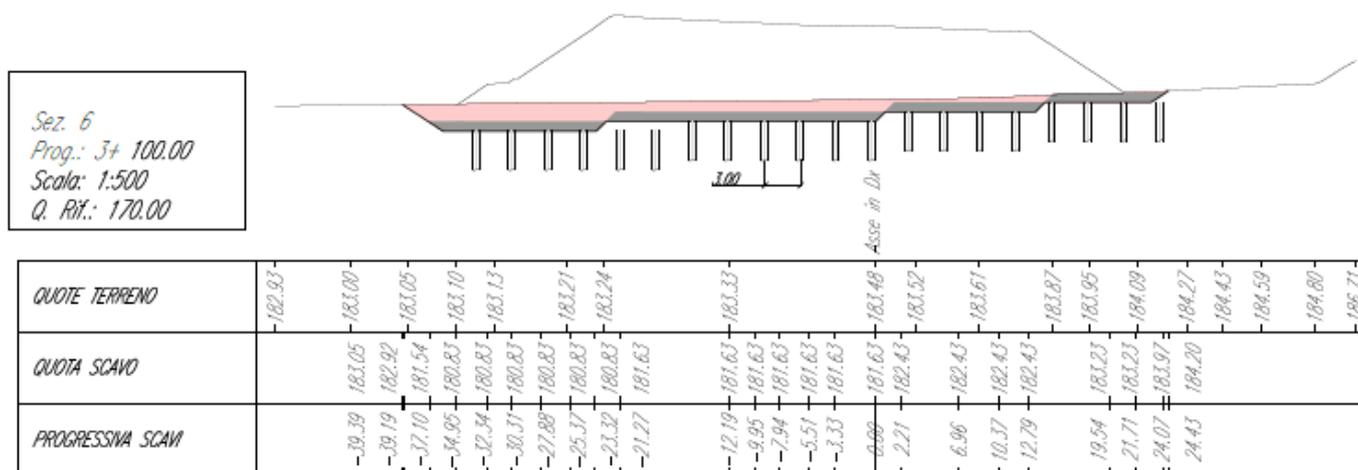


Figura 101: Sezione al km 3+100

13.1. STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

In Tabella 35 sono riportati i valori dei parametri geotecnici caratteristici del terreno naturale. Nella stessa tabella sono riportati anche gli spessori indicativi degli strati; in ogni caso per la stratigrafia lungo la sezione si è fatto riferimento al profilo geotecnico e alle sezioni geotecniche e geologiche.

Con riferimento ai materiali antropici (rilevato e bonifico) si rimanda alla Tabella 7.

La falda di progetto è stata assunta per tutte le verifiche come prossima al piano campagna (a circa 1 m di profondità), dato che in questa zona le misure piezometriche indicano tutte la falda vicina al piano campagna a profondità dell'ordine di 1-2 m.

Per maggiore dettaglio si rimanda alla relazione geotecnica di progetto (Doc. Rif. [9.]).

Tabella 35: Parametri geotecnici di calcolo dei materiali in sito

Unità	Prof. da [m da p.c.]	Prof. a [m da p.c.]	γ [kN/m ³]	φ' [°]	c' [kPa]	c_u [kPa]	E'_{op} [Mpa]	C_c [-]	C_r [-]	e_0 [-]	OCR [-]
b1-F/b-F	0	3-6	18.5	21	0	-	2.5	-	-	-	-
b1-G/b-G	0-3	3-6	19	35	0	-	30	-	-	-	-
SAF	6	>6	19	21	25	250	-	0.17	0.05	0.7	2

13.2. VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE

Per la verifica di stabilità globale del rilevato, è stato implementato un modello 2D tramite il codice di calcolo SLOPE/W descritto al paragrafo 6.2.1.

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.

Per completezza si riportano in Figura 102 e Figura 103 le analisi di stabilità del rilevato in assenza di interventi. Come si può notare i requisiti minimi di normativa in termini di stabilità del rilevato non sono garantiti. Nei successivi paragrafi si riportano le analisi di stabilità in presenza di interventi.

Per il terreno trattato con inclusioni rigide è stata stimata una resistenza equivalente stimata come segue:

- Classe calcestruzzo: C16/20;
- $f_{ck} = 16 \text{ MPa}$;
- $f_{cd} = 16/1.5 = 10.7 \text{ MPa}$;
- $\tau_{max} = 10.7 \cdot 0.85/2 = 4.55 \text{ MPa}$;
- $c_{eq} = \tau_{max} \cdot A_{incl} / A_{tot} = 4550 \cdot 0.28 / 5.3 = 240 \text{ kPa}$;

Dove

- A_{incl} = area della sezione dell'inclusione di diametro 0.6m;
- A_{tot} = area di influenza della singola inclusione con interasse 3.5 m a maglia quinconce.

Tale resistenza equivalente viene comunque fattorizzata nelle analisi di stabilità globale secondo il coefficiente $\gamma_M = 1.25$ da normativa, quindi:

- $c_{eq,k} = 240 \text{ kPa}$;
- $c_{eq,d} = 240/1.25 = 192 \text{ kPa}$;

A tale resistenza viene comunque associato l'angolo di attrito del materiale naturale che non viene influenzato dalla presenza delle colonne.

13.2.1. Verifiche SLU in condizioni statiche

In accordo a quanto dichiarato al paragrafo 3.1.1, le analisi sono state implementate in accordo all'Approccio 1 - Combinazione 2 e la verifica risulta soddisfatta per un fattore di sicurezza pari a $FS_{min}=1.1$.

In Tabella 36 si riportano il fattore di sicurezza calcolato e la figura di riferimento con indicazione del meccanismo critico associato ad esso; essendo $FS > 1.1$, **la verifica di stabilità globale in campo statico è soddisfatta.**

Tabella 36: Analisi di stabilità globale in campo statico

Sezione di calcolo	FS	Meccanismo di riferimento
RIL08 (km 2+875)	1.219	Figura 104
RIL08 (km 3+100)	1.115	Figura 105

13.2.2. Verifiche SLU in condizioni sismiche

In accordo a quanto dichiarato al paragrafo 3.2, le analisi sono state implementate considerando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici e la verifica risulta soddisfatta per un fattore di sicurezza pari a $FS_{min}=1.2$.

In Tabella 37 si riportano il fattore di sicurezza calcolato e la figura di riferimento con indicazione del meccanismo critico associato ad esso; essendo $FS>1.2$, **la verifica di stabilità globale in campo pseudo statico è soddisfatta.**

Tabella 37: Analisi di stabilità globale in campo statico

Sezione di calcolo	FS	Meccanismo di riferimento
RIL08 (km 2+875)	1.394 (kv>0)	Figura 106 (kv>0)
	1.388 (kv<0)	Figura 107 (kv<0)
RIL08 (km 3+100)	1.265 (kv>0)	Figura 108 (kv>0)
	1.253 (kv<0)	Figura 109 (kv<0)

**AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
 TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)**
**Analisi di stabilità rilevati
 Sez. 2+875**
Statica

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 32 °	Piezometric Line: 1
Name: Bonifico	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 30.2 °	Piezometric Line: 1
Name: SAF	Model: Undrained (Phi=0)	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 178.6 kPa		Piezometric Line: 1
Name: b-f	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 18.5 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: b-g	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 29.25 °	Piezometric Line: 1

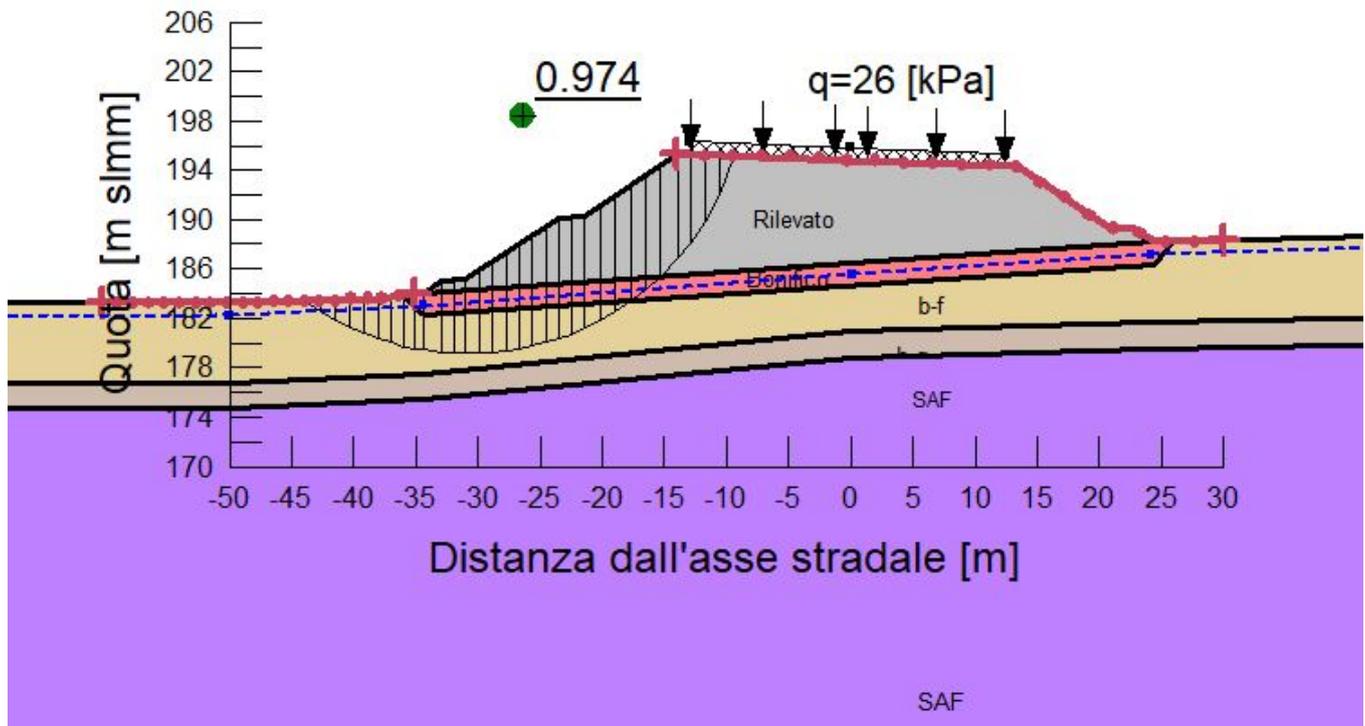


Figura 102: Modello SLOPE (senza interventi) – Sezione km 2+875 – Analisi di stabilità in condizioni statiche

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 3+100
Condizioni statiche

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 32 ° Piezometric Line: 1
 Name: SAF Model: Undrained (Phi=0) Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 178.6 kPa Piezometric Line: 1
 Name: b-f Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 18.5 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: b-g Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 29.25 ° Piezometric Line: 1

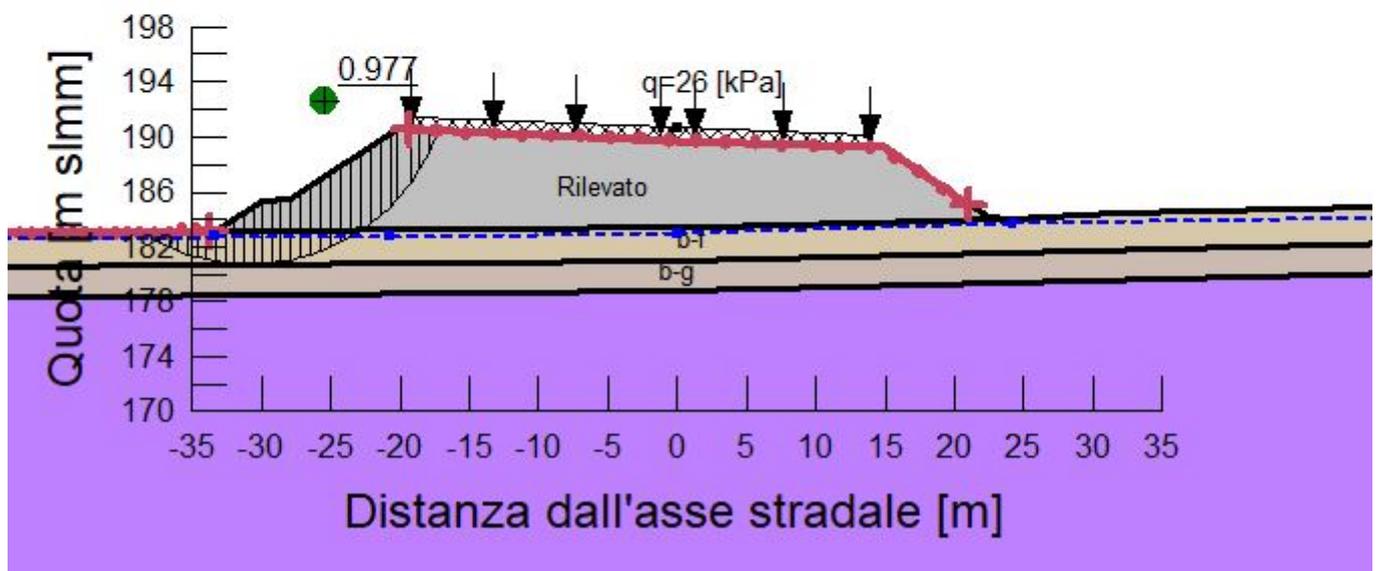


Figura 103: Modello SLOPE (senza interventi) – Sezione km 3+100 – Analisi di stabilità in condizioni statiche

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 2+875
Statica

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 32 ° Piezometric Line: 1
 Name: Strato di ripartizione Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 30.2 ° Piezometric Line: 1
 Name: SAF Model: Undrained (Phi=0) Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 178.6 kPa Piezometric Line: 1
 Name: b-f Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 18.5 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1
 Name: b-g Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 29.25 ° Piezometric Line: 1
 Name: CFA Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19.3 kN/m³ Cohesion: 192 kPa Phi: 17.1 ° Piezometric Line: 1

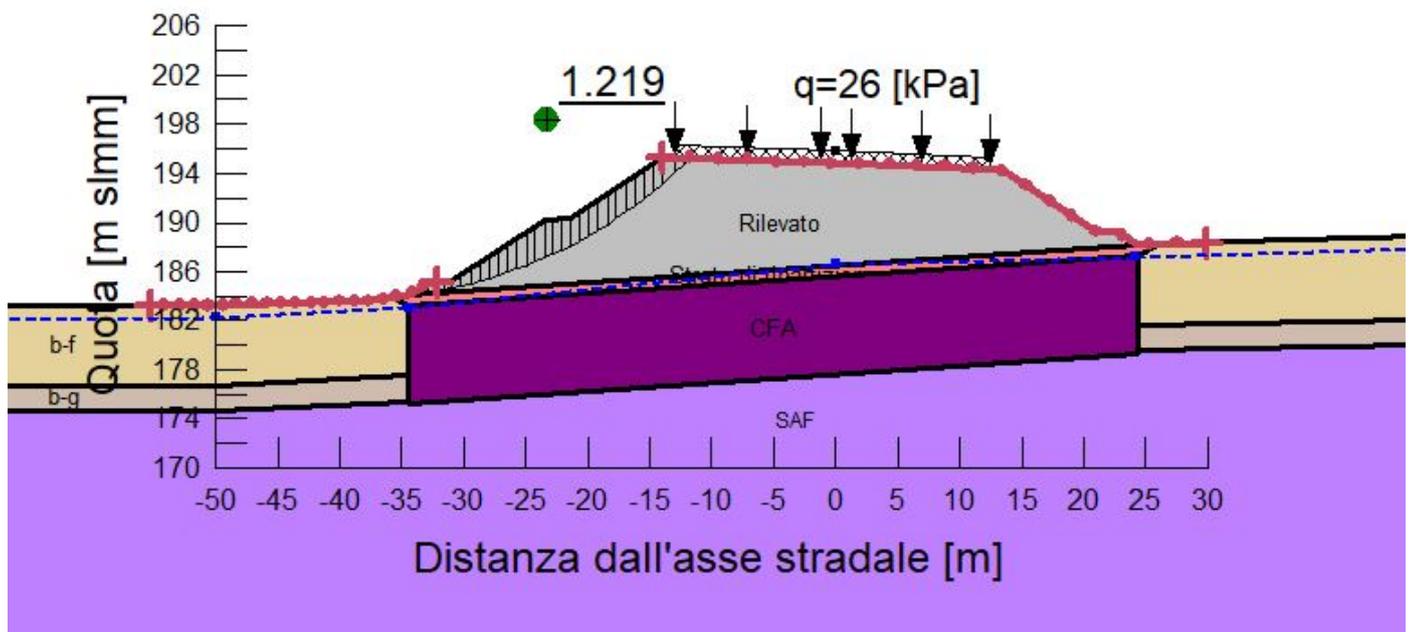


Figura 104: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 2+875 – Analisi di stabilità in condizioni statiche

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 3+100
Condizioni statiche

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 32 °	Piezometric Line: 1
Name: SAF	Model: Undrained (Phi=0)	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 178.6 kPa	Phi: 0 °	Piezometric Line: 1
Name: Bonifico	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 30.2 °	Piezometric Line: 1
Name: b-f	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 18.5 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 17.1 °	Piezometric Line: 1
Name: b-g	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 29.25 °	Piezometric Line: 1

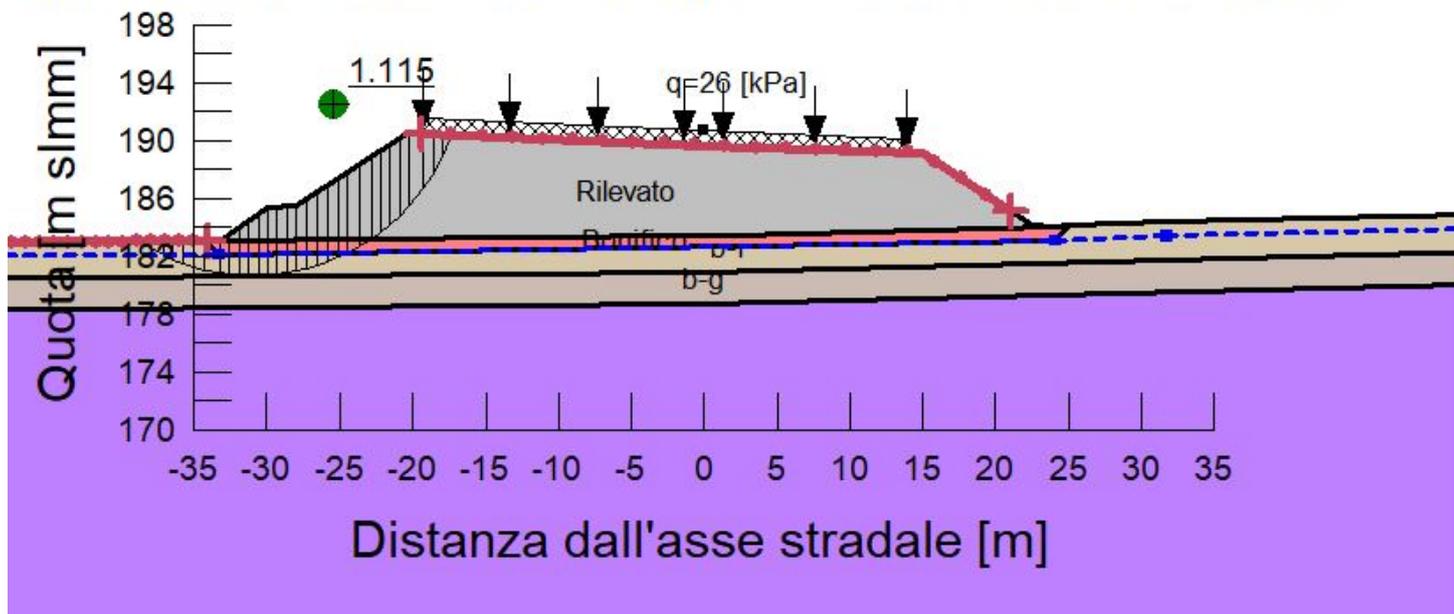
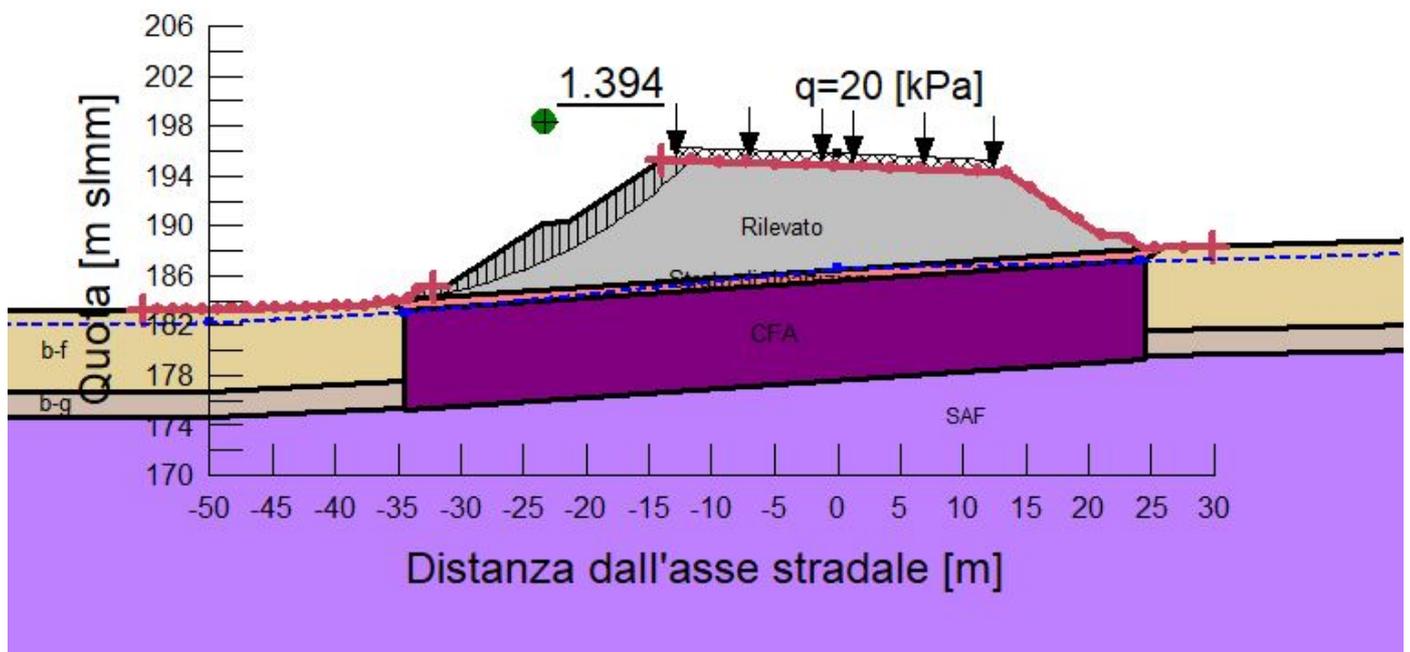


Figura 105: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 3+100 – Analisi di stabilità in condizioni statiche

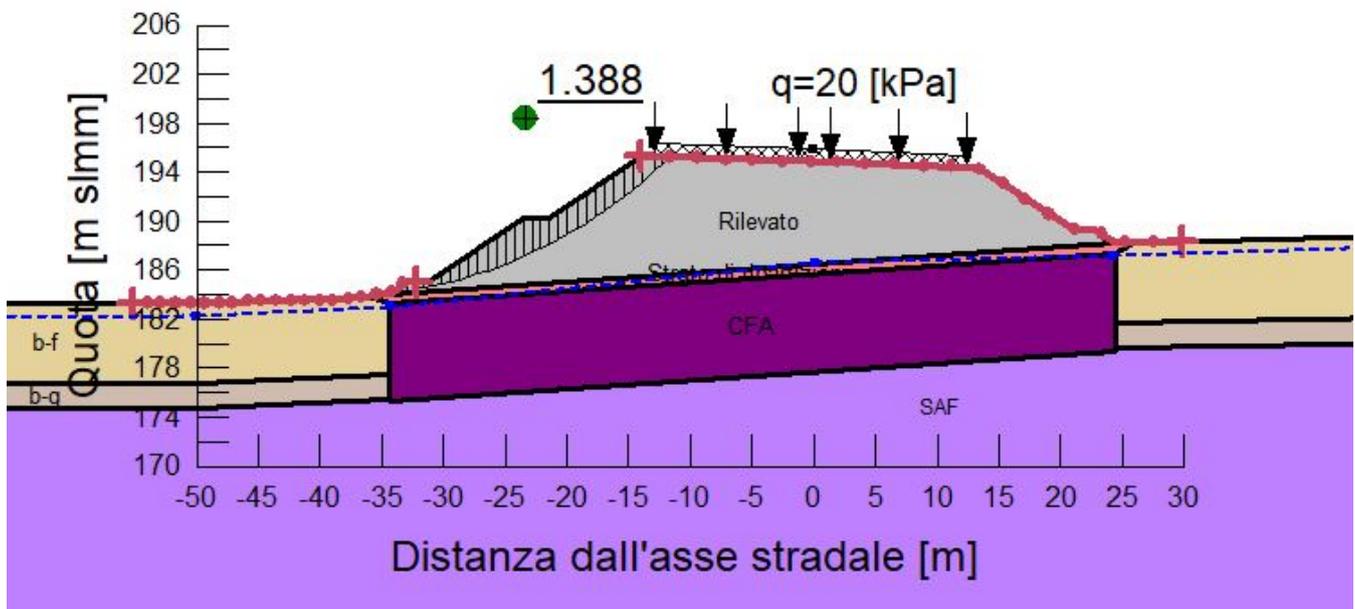
**AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
 TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)**
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 2+875
Condizioni sismiche $kh=0.044$ $kv=0.022$

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 38 ° Piezometric Line: 1
 Name: Strato di ripartizione Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 36 ° Piezometric Line: 1
 Name: SAF Model: Undrained (Phi=0) Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 250 kPa Piezometric Line: 1
 Name: b-f Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 18.5 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: b-g Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 35 ° Piezometric Line: 1
 Name: CFA Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19.3 kN/m³ Cohesion: 240 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1


 Figura 106: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 2+875 – Analisi di stabilità in condizioni sismiche ($kv>0$)

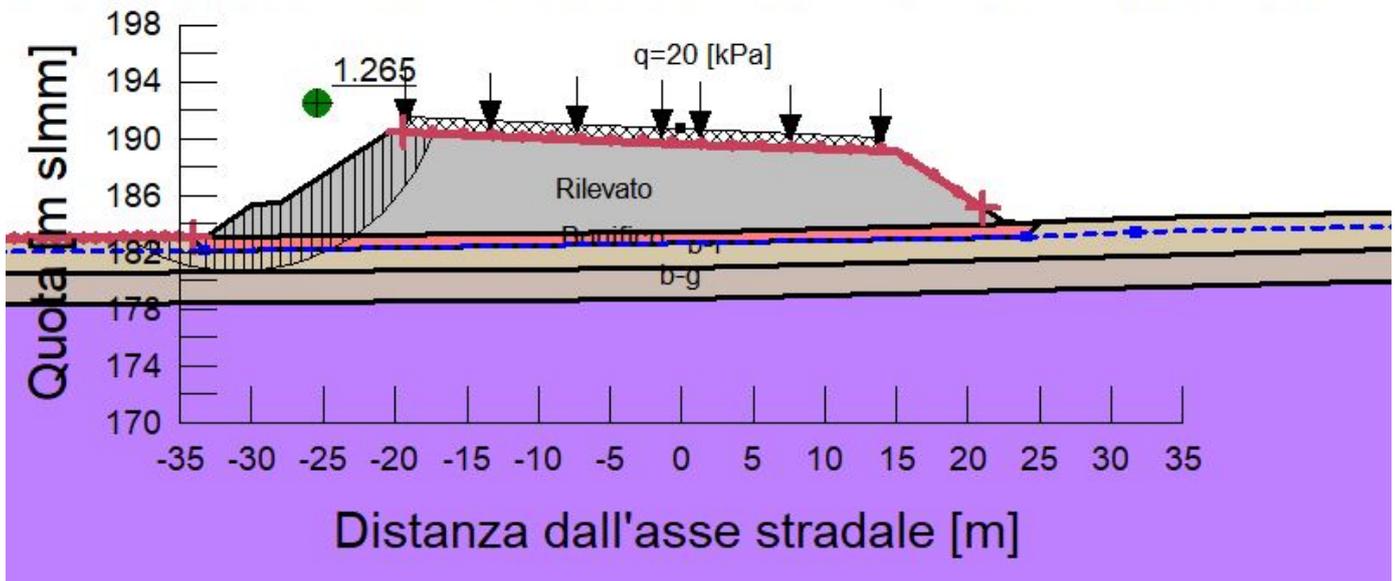
**AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
 TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)**
**Analisi di stabilità rilevati
 Sez. 2+875**
Condizioni sismiche $k_h=0.044$ $k_v=-0.022$

Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 38 ° Piezometric Line: 1
 Name: Strato di ripartizione Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 36 ° Piezometric Line: 1
 Name: SAF Model: Undrained (Phi=0) Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 250 kPa Piezometric Line: 1
 Name: b-f Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 18.5 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1
 Name: b-g Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 35 ° Piezometric Line: 1
 Name: CFA Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19.3 kN/m³ Cohesion: 240 kPa Phi: 21 ° Piezometric Line: 1


 Figura 107: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 2+875 – Analisi di stabilità sismica ($k_v < 0$)

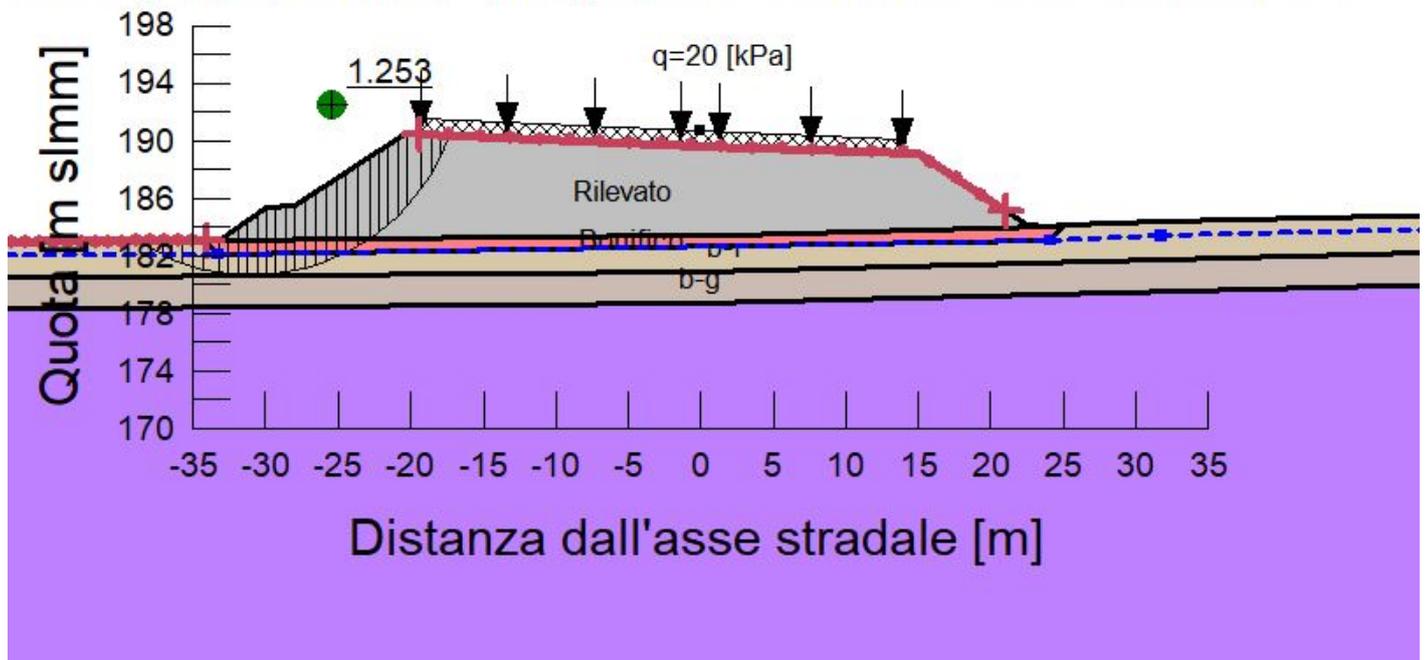
AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 3+100
Condizioni sismiche $k_h=0.044$ $k_v=0.022$

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 38 °	Piezometric Line: 1
Name: SAF	Model: Undrained (Phi=0)	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 250 kPa	Phi: 0 °	Piezometric Line: 1
Name: Bonifico	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 36 °	Piezometric Line: 1
Name: b-f	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 18.5 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: b-g	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 35 °	Piezometric Line: 1


 Figura 108: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 2+875 – Analisi di stabilità in condizioni sismiche ($k_v>0$)

AUTOSTRADA A33 ASTI - CUNEO
TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
Analisi di stabilità rilevati
Sez. 3+100
Condizioni sismiche $k_h=0.044$ $k_v=-0.022$

Name: Rilevato	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 38 °	Piezometric Line: 1
Name: SAF	Model: Undrained (Phi=0)	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 250 kPa	Phi: 0 °	Piezometric Line: 1
Name: Bonifico	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 36 °	Piezometric Line: 1
Name: b-f	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 18.5 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 21 °	Piezometric Line: 1
Name: b-g	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 35 °	Piezometric Line: 1


 Figura 109: Modello SLOPE (con interventi) – Sezione km 3+100 – Analisi di stabilità sismica ($k_v < 0$)

13.3. VERIFICHE SLE

13.3.1. Introduzione e descrizione interventi

Per la stima dei cedimenti al di sotto del rilevato, è stato implementato un modello 2D ad elementi finiti tramite il codice di calcolo PLAXIS descritto al paragrafo 6.2.2.

Le analisi sono finalizzate alla stima dei cedimenti attesi nel tempo e alla stima del cedimento residuo definito come la differenza tra il cedimento calcolato nella fase di “messa in esercizio” e i cedimenti attesi a lungo termine, considerando una durata significativa di 50 anni dopo la costruzione del rilevato.

La progettazione e il dimensionamento degli interventi hanno avuto come criterio quello di limitare il cedimento entro limiti accettabili, sia in termini di cedimento totale a lungo termine, che in termini di cedimento residuo dopo il termine dei lavori.

Per il caso particolare si prevedono interventi di miglioramento del terreno come descritto nell'introduzione al capitolo 13, che possono essere costituiti da inclusioni rigide oppure semplice bonifica in relazione all'altezza del rilevato.

Per quanto riguarda l'analisi dei cedimenti in presenza di inclusioni rigide, la rigidità equivalente dello strato trattato è stata valutata mediante un ulteriore modello Plaxis assialsimmetrico, dove viene considerato quanto segue:

- Asse di simmetria coincidente con l'asse della singola colonna di trattamento;
- Raggio del modello pari a quello che restituisce un'area pari a quella di influenza di ciascuna colonna;
- Raggio della singola colonna pari a 0.3 m (nel modello viene rappresentata “mezza” colonna);
- Stratigrafia, falda e parametri geotecnici come dichiarati al precedente paragrafo 13.1;
- Strato di ripartizione di spessore 0.8 m a cui vengono assegnati gli stessi parametri geotecnici del bonifico;
- Carico corrispondente al peso del rilevato in asse;

La mesh di calcolo è rappresentata in Figura 110. Il modulo equivalente dello strato trattato viene preso valutato come rapporto tra il carico applicato e la deformazione (rapporto tra cedimento e altezza complessiva dello strato) dello strato compreso tra la testa e la base delle colonne al bordo del modello assialsimmetrico (quindi nel punto intermedio tra le colonne).

I risultati di tale valutazione sono riportati in Figura 111 in termini di contour dei cedimenti del modello e in Tabella 38 in termini di cedimento al bordo del modello nei due punti indicati sopra. Il modulo equivalente risulta quindi $E' = 190 / ((0.713 - 0.234) / 8) \approx 3200$ kPa.

Tabella 38: Sintesi della valutazione dei cedimenti per la stima del modulo equivalente dello strato trattato

Cedimento a testa strato trattato (base ripartitore)	Cedimento a base strato trattato	Spessore strato trattato
(m)	(m)	(m)
0.713	0.234	8

Output Version 2019.0.0.0

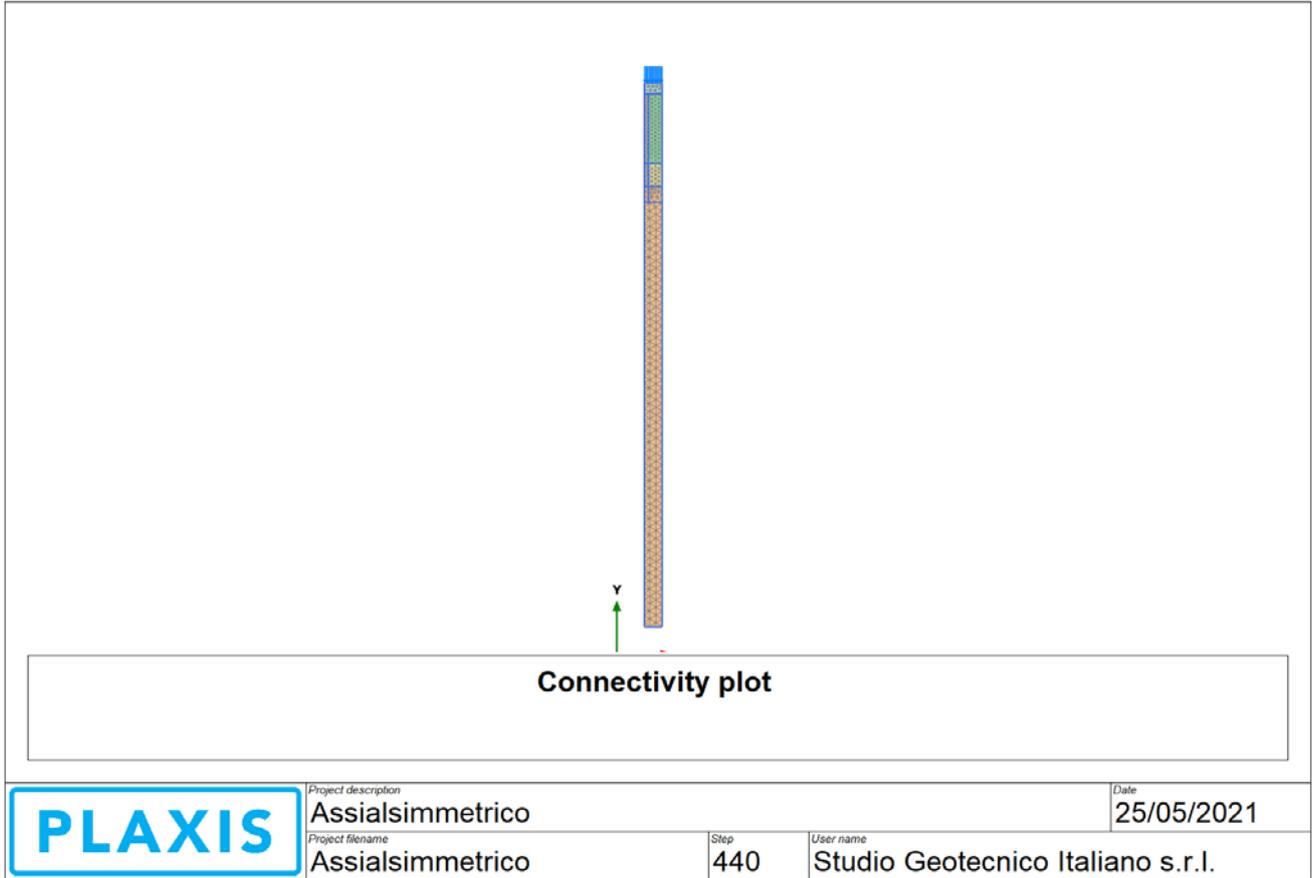


Figura 110 – Modello PLAXIS assialsimmetrico per la valutazione della rigidezza equivalente dello strato trattato

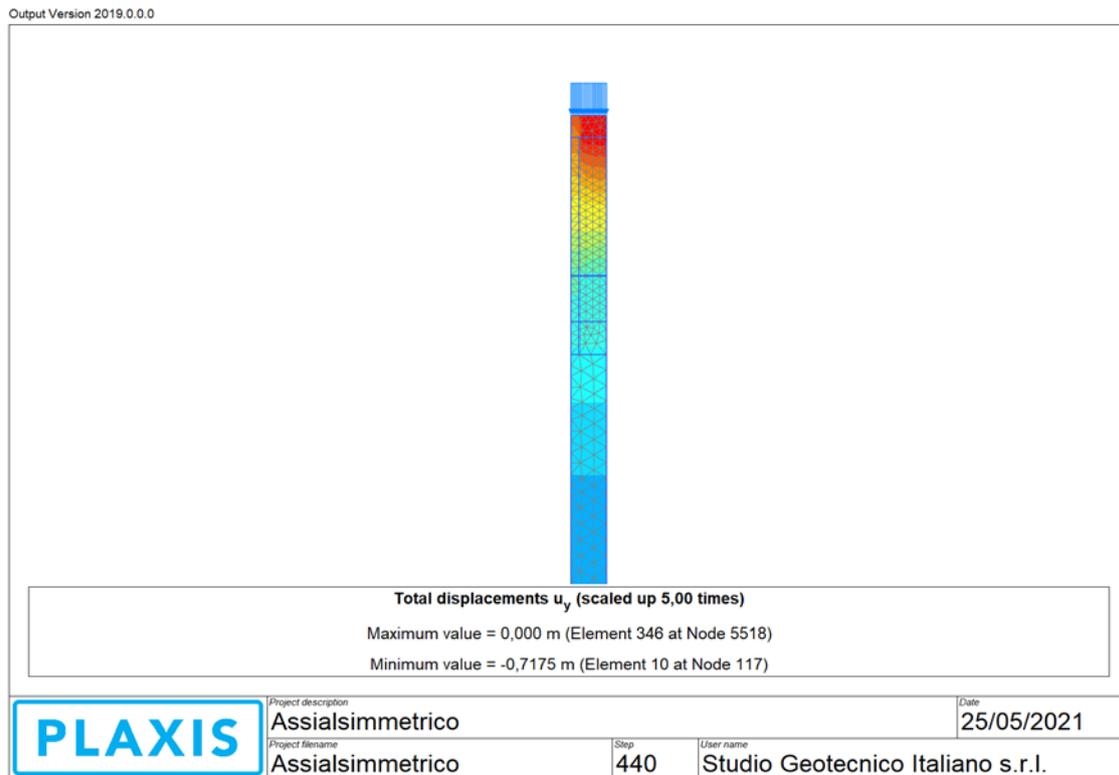


Figura 111 – Modello PLAXIS assialsimmetrico – contour dei cedimenti del modello soggetto al carico del rilevato

13.3.2. Mesh, stratigrafia e falda

La mesh e la stratigrafia per le due sezioni analizzate sono mostrate di seguito in Figura 112 e Figura 113. La stratigrafia è stata presa in sezione facendo riferimento a quanto riportato sul profilo geotecnico e sulle sezioni geotecniche. La falda è stata considerata a livelli “standard”, ovvero a quanto riportato sul profilo geotecnico; la falda si trova a circa 1 m di profondità da piano campagna.

13.3.3. Modelli costitutivi e parametri geotecnici caratteristici

Per tutti gli strati di terreno naturale si è fatto riferimento ad un modello costitutivo “Soft-Soil”, dove la cedevolezza è governata dai coefficienti di compressibilità in primo carico, in scarico e ricarico e dal grado di sovraconsolidazione, con un modulo corrente quindi variabile in relazione allo stato tensionale corrente. I parametri geotecnici caratteristici utilizzati sono quelli dichiarati in Tabella 8. La permeabilità è stata presa pari a 10^{-8} m/s.

Per i materiali costituenti la bonifica, il ripartitore (caratterizzato per semplicità come il materiale di bonifica) e il rilevato si è invece fatto riferimento ad un modello costitutivo “Mohr-Coulomb”. I parametri geotecnici caratteristici utilizzati sono quelli dichiarati in Tabella 7. La permeabilità è stata presa pari a 10^{-4} m/s.

Per lo strato di materiale trattato con inclusioni rigide si è fatto riferimento ad un modello costitutivo “Mohr-Coulomb” con modulo elastico come stimato al precedente paragrafo 13.3.1 e parametri di resistenza equivalenti come stimato al precedente paragrafo 13.2. La permeabilità è stata presa come

quella del terreno naturale, quindi pari a 10^{-8} m/s dove è presente la formazione b-f e 10^{-5} dove è presente la formazione b-g.

13.3.4. Carichi

Nelle analisi effettuate per la valutazione dei cedimenti non sono stati considerati sovraccarichi di tipo variabile.

13.3.5. Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono quelle “standard” automaticamente impostate nel codice di calcolo, ovvero spostamenti orizzontali bloccati ai bordi verticali del modello e spostamenti verticali bloccati alla base del modello.

Le condizioni idrauliche al contorno sono quelle “standard” automaticamente impostate nel codice di calcolo, ovvero moto di filtrazione consentito ai bordi verticali ma impedita alla base del modello.

13.3.6. Fasi di calcolo

Le fasi di costruzione simulate nel calcolo sono le seguenti:

6. Generazione dello stato tensionale iniziale con piano campagna attuale;
7. Scavo e sostituzione fino a 2 m di profondità per bonifica oppure installazione inclusioni rigide;
8. Costruzione del rilevato sino all'altezza di progetto (durata 180 giorni)
9. Attesa 1 anno per la stima dei cedimenti a fine costruzione rilevato, prima della messa in esercizio dell'autostrada;
10. Attesa 50 anni per la stima dei cedimenti a lungo termine.

Le prime due fasi sono state effettuate senza considerare la consolidazione (a “lungo termine”), mentre per le successive la consolidazione è stata considerata assegnando dei tempi compatibili con quelli di costruzione di un rilevato autostradale. I cedimenti sono valutati nel seguito a partire dall'inizio della suddetta fase 3.

13.3.7. Risultati

I risultati delle analisi FEM per la stima dei cedimenti sono riportati nelle figure seguenti, in particolare:

Per la sezione al km 2+875

- In Figura 114 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 4 di cui sopra;
- In Figura 115 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 5 di cui sopra;
- In Figura 116 si riporta l'andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3 di cui sopra) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso;
- In Figura 117 si riporta l'andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5 di cui sopra.

Per la sezione al km 3+100

- In Figura 118 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 4 di cui sopra;

- In Figura 119 si riporta la distribuzione dei cedimenti stimata dal modello alla fine della fase 5 di cui sopra;
- In Figura 120 si riporta l'andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3 di cui sopra) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso;
- In Figura 121 si riporta l'andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5 di cui sopra.

In Tabella 39 si riportano i cedimenti stimati per un punto in asse al rilevato, alla base dello stesso (derivati da Figura 117 e Figura 121) alla fine della costruzione dell'opera (prima della messa in esercizio, fine della fase 4 di cui sopra) e a "lungo termine" (fine della fase 5 di cui sopra). Nella stessa tabella si riporta il valore del cedimento residuo a "lungo termine" pari alla differenza fra i due precedenti.

Con riferimento ai risultati ottenuti sia in termini di valore assoluto (da inizio costruzione rilevato) che residuo dopo la messa in esercizio dell'opera, si ritiene che i valori di cedimento stimati siano compatibili con la funzionalità dell'opera. I cedimenti che si verificano all'interno del corpo del rilevato sono dell'ordine di massimo 2 cm (vedi Figura 116 e Figura 120) e possono essere "recuperati" durante la costruzione del rilevato stesso.

Tabella 39: Sintesi sulla valutazione dei cedimenti

Sezione di calcolo	Cedimento a base rilevato, in asse rilevato prima della messa in esercizio (cm)	Cedimento a base rilevato, in asse rilevato a lungo termine (cm)	Cedimento residuo (cm)
RIL08 (km 2+875)	46,7	52,5	5.8
RIL08 (km 3+100)	29.4	35.8	6.4

Output Version 2019.0.0.0

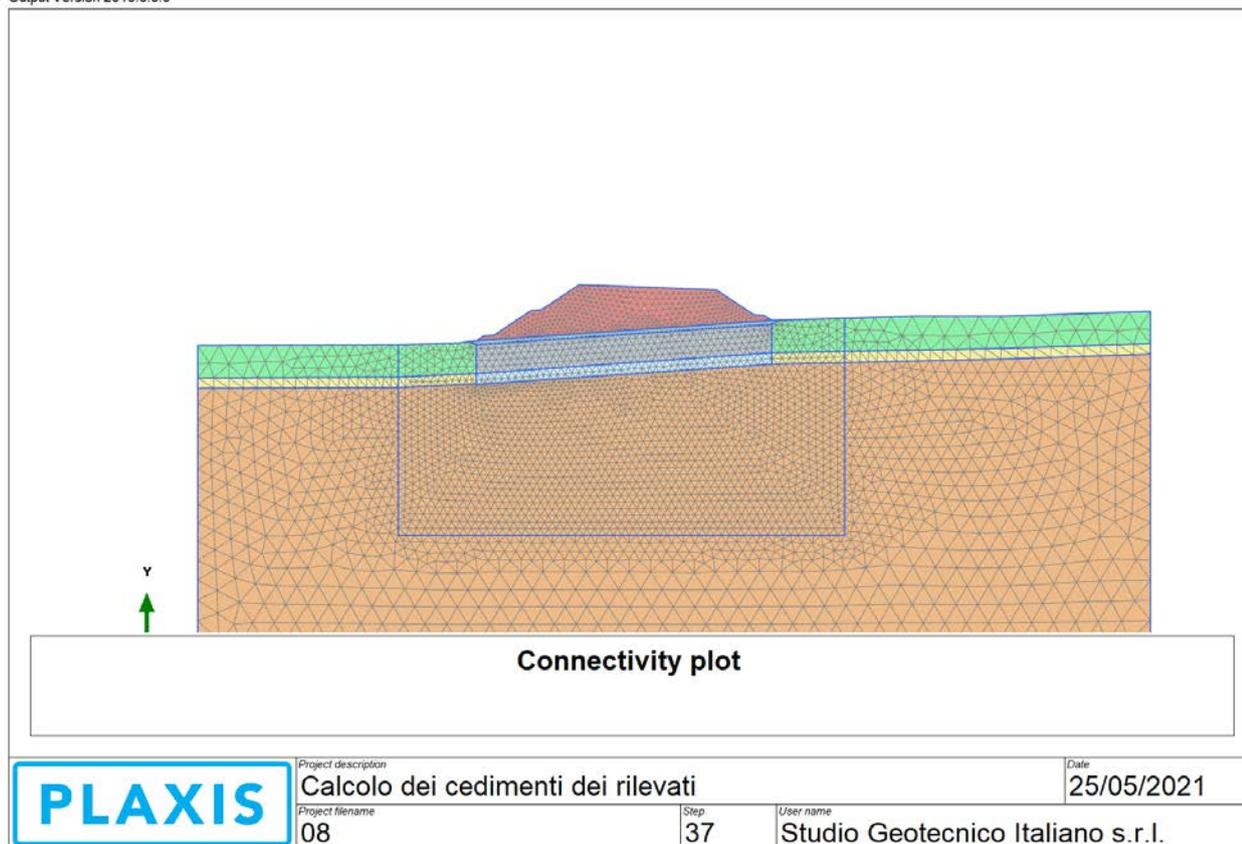


Figura 112 – Modello PLAXIS (con interventi) – Sezione km 2+875

Output Version 2019.0.0.0

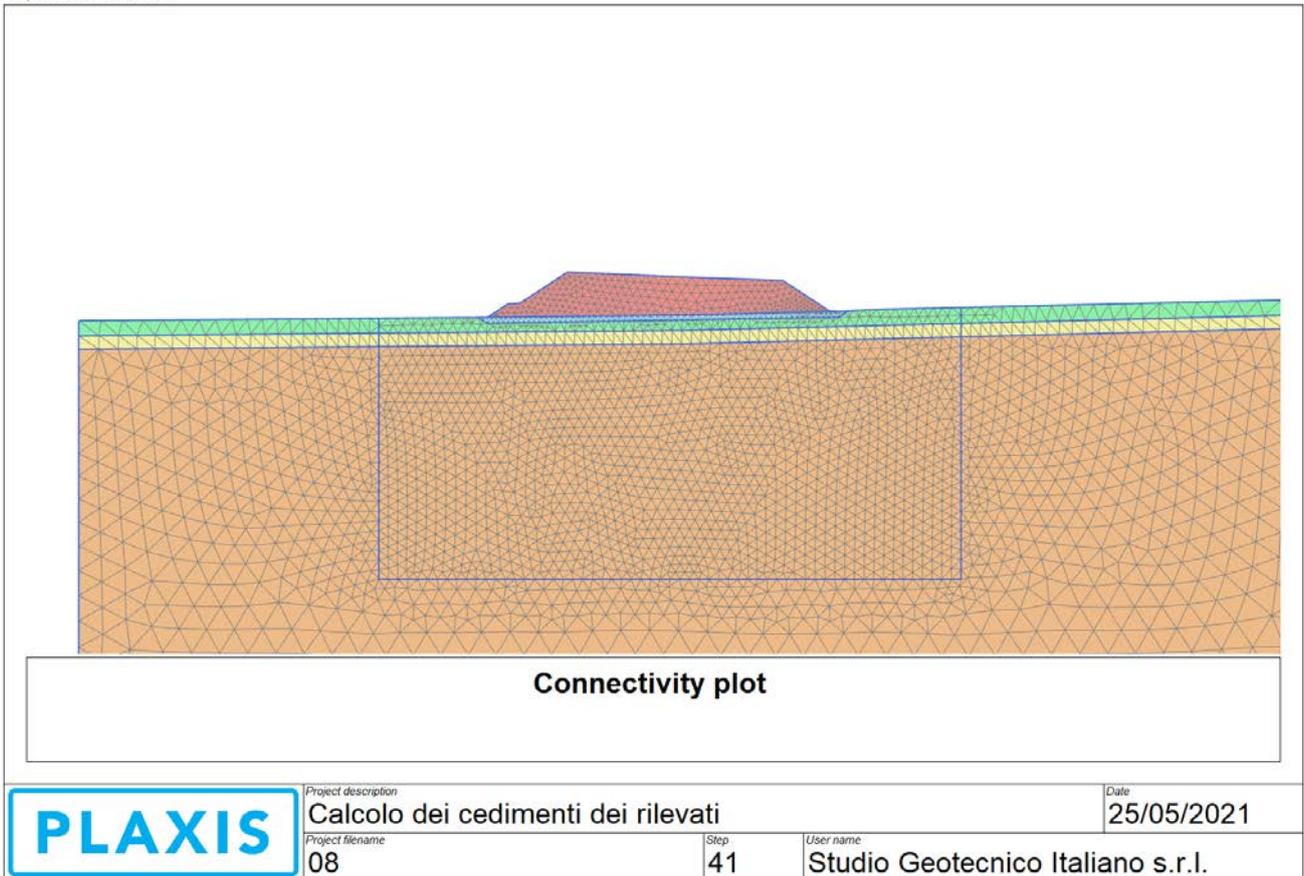


Figura 113 – Modello PLAXIS (con interventi) – Sezione km 3+100

Output Version 2019.0.0.0

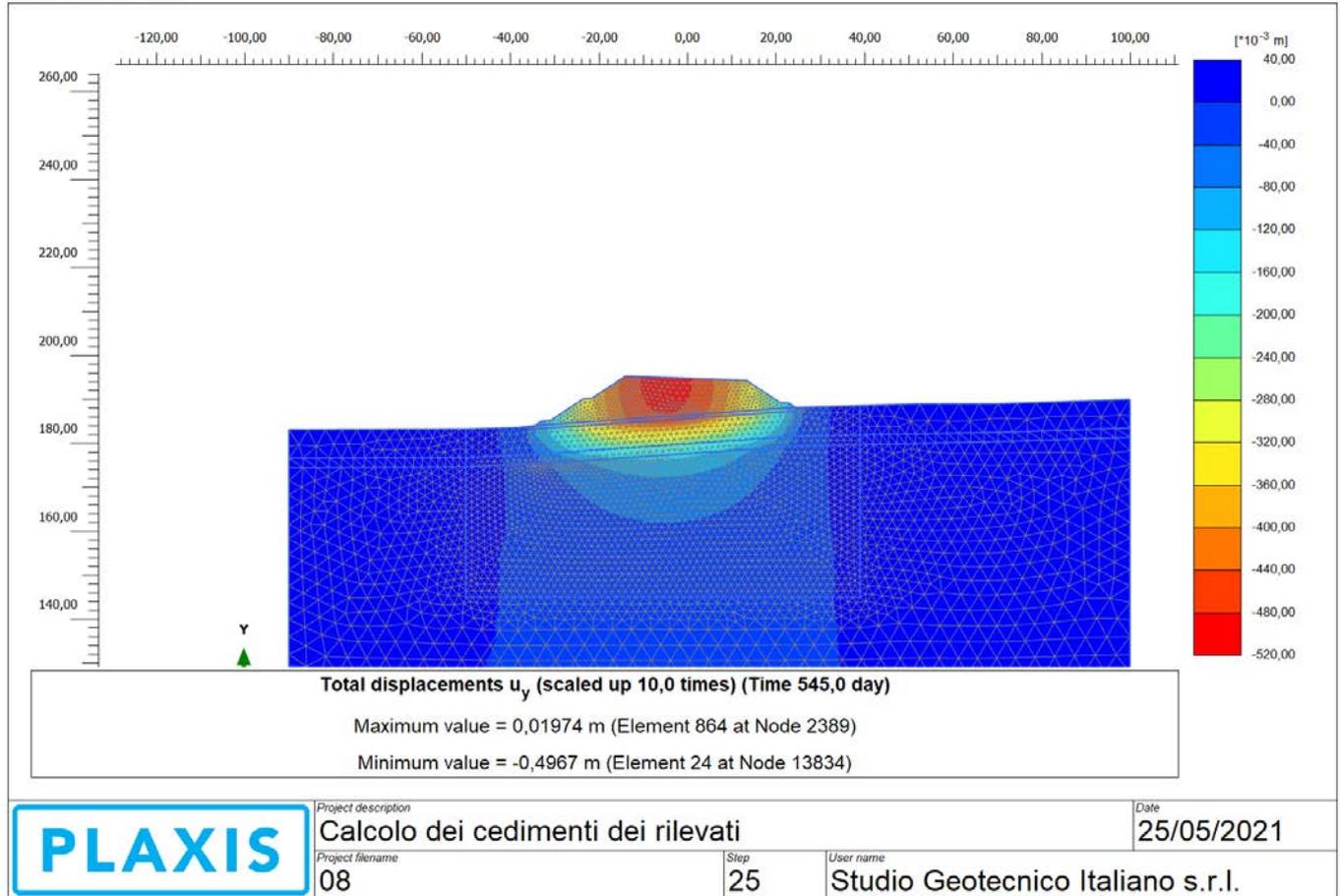


Figura 114: Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+875 – cedimenti del modello a fine fase 4

Output Version 2019.0.0.0

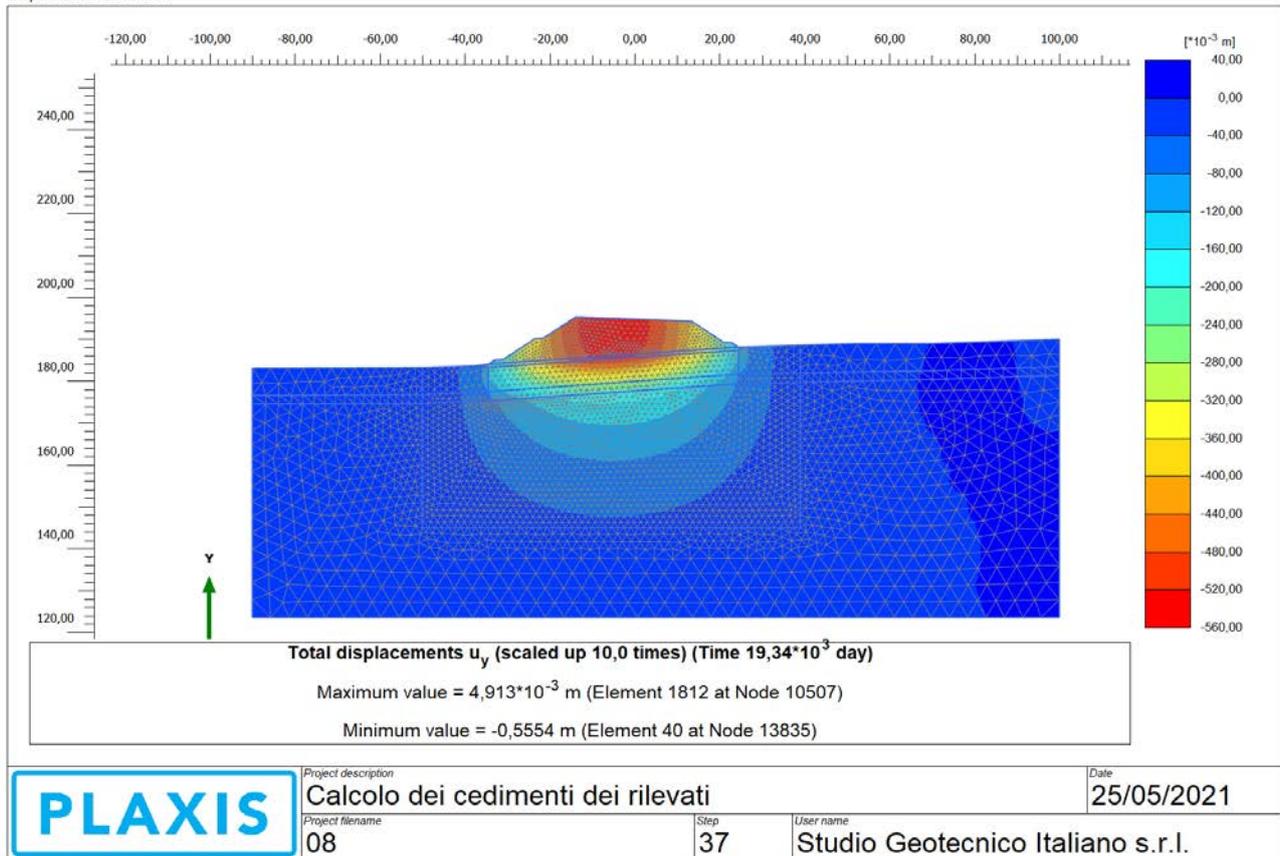


Figura 115 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+875 – cedimenti del modello a fine fase 5

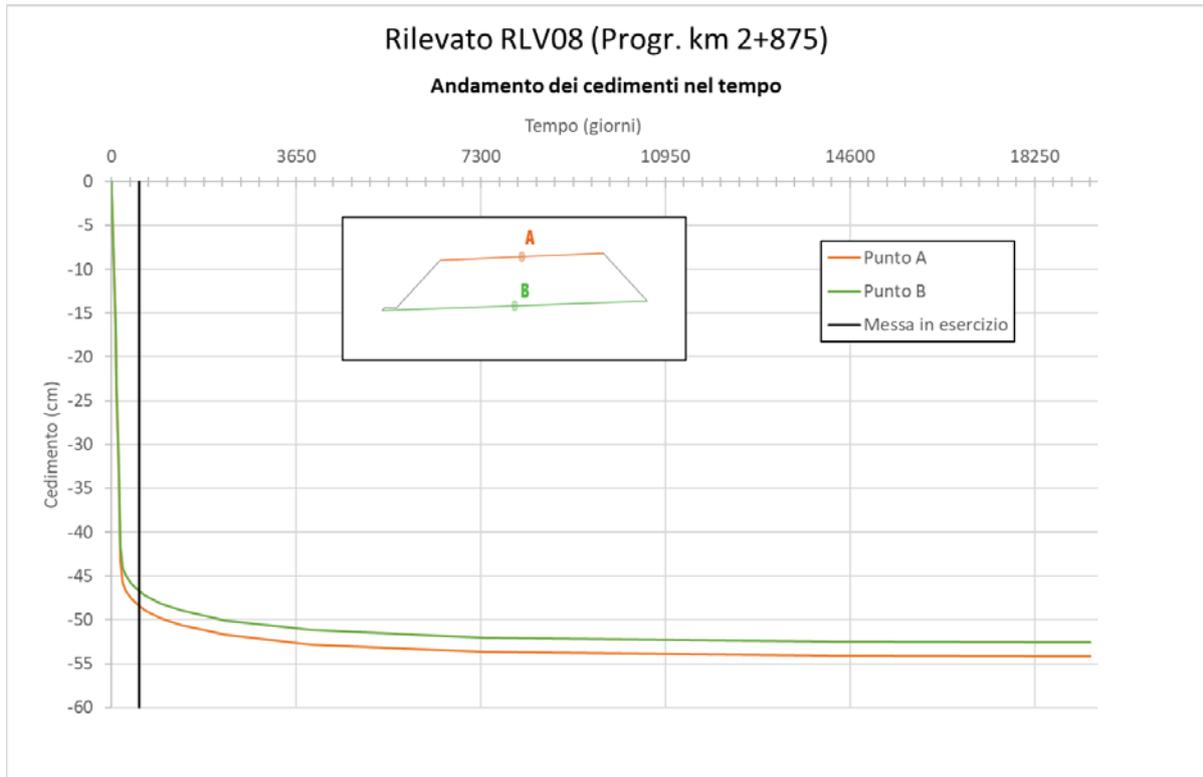


Figura 116 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+875 – andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso

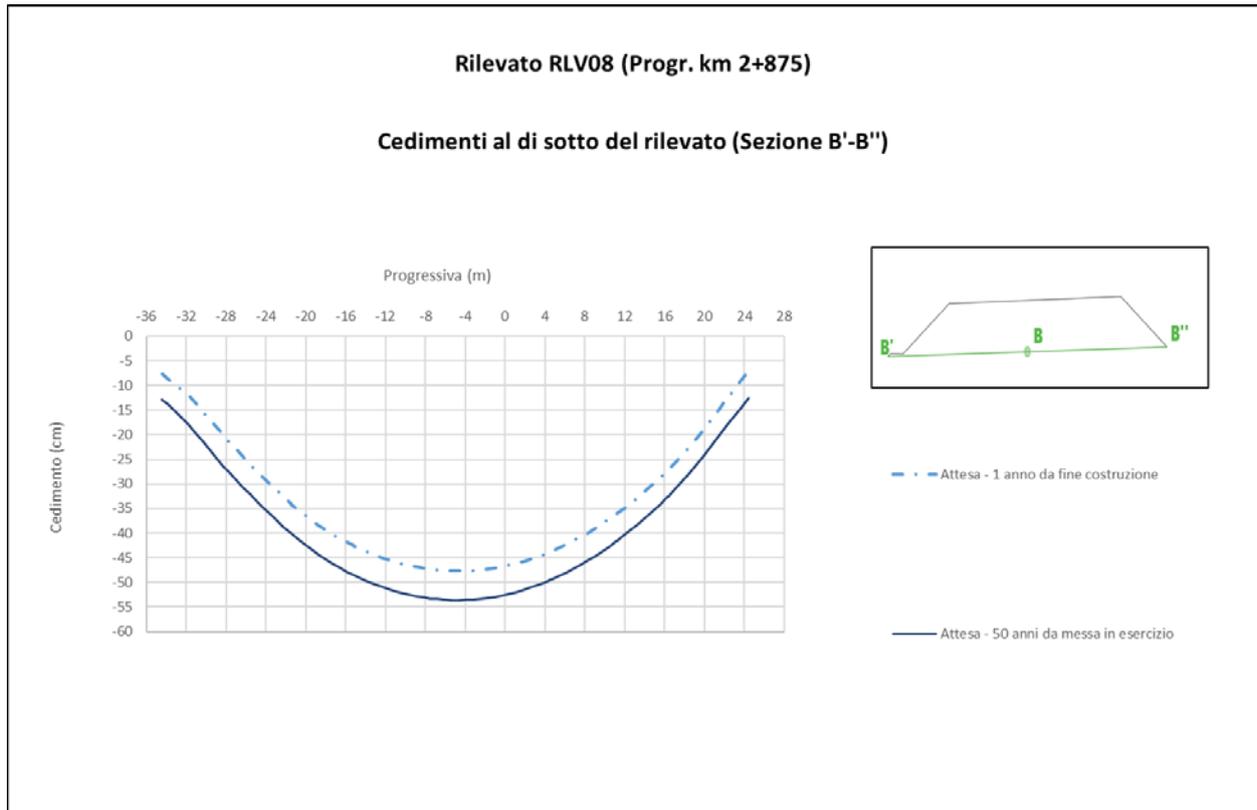


Figura 117 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 2+875 – andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5

Output Version 2019.0.0.0

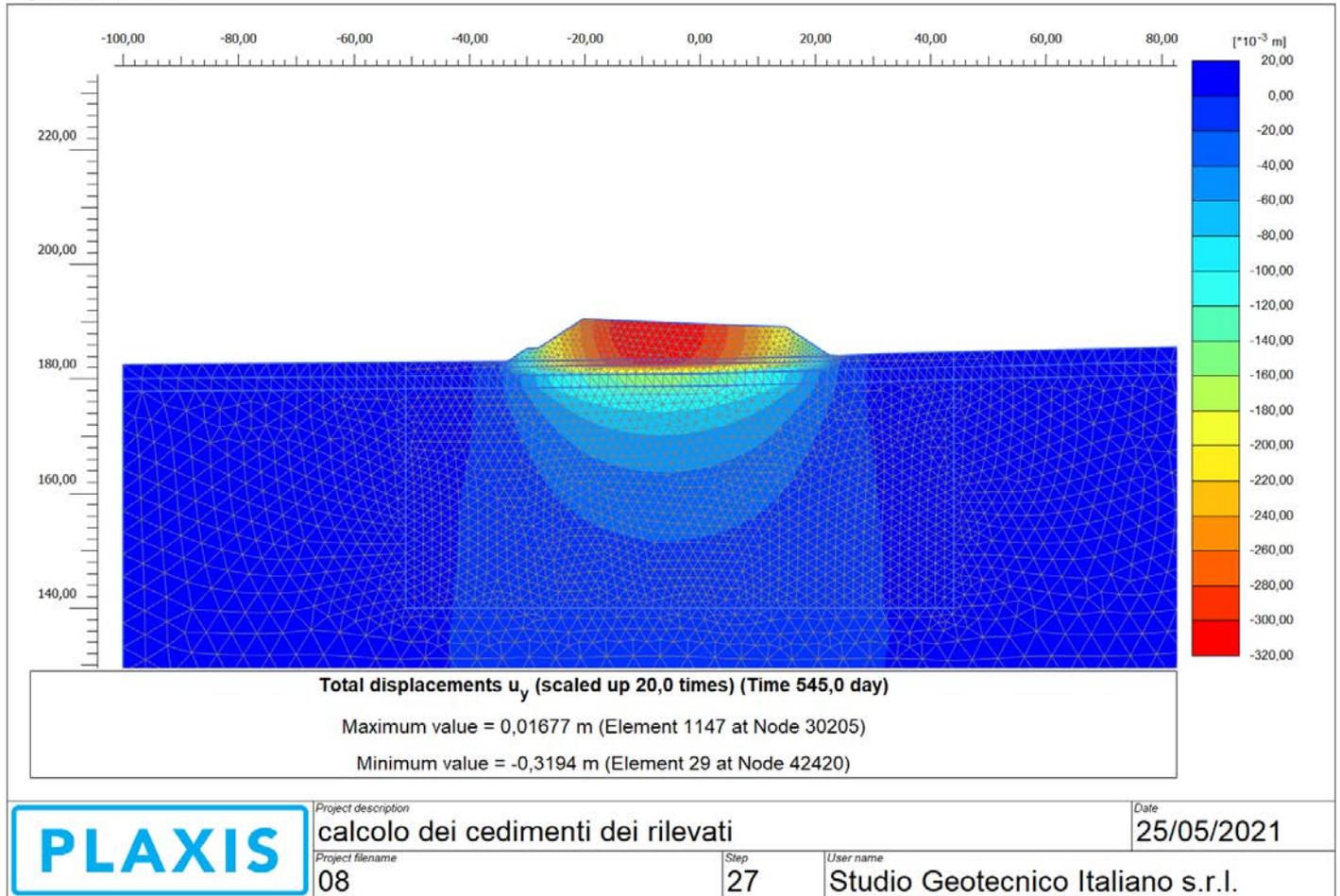


Figura 118: Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 3+100 – cedimenti del modello a fine fase 4

Output Version 2019.0.0.0

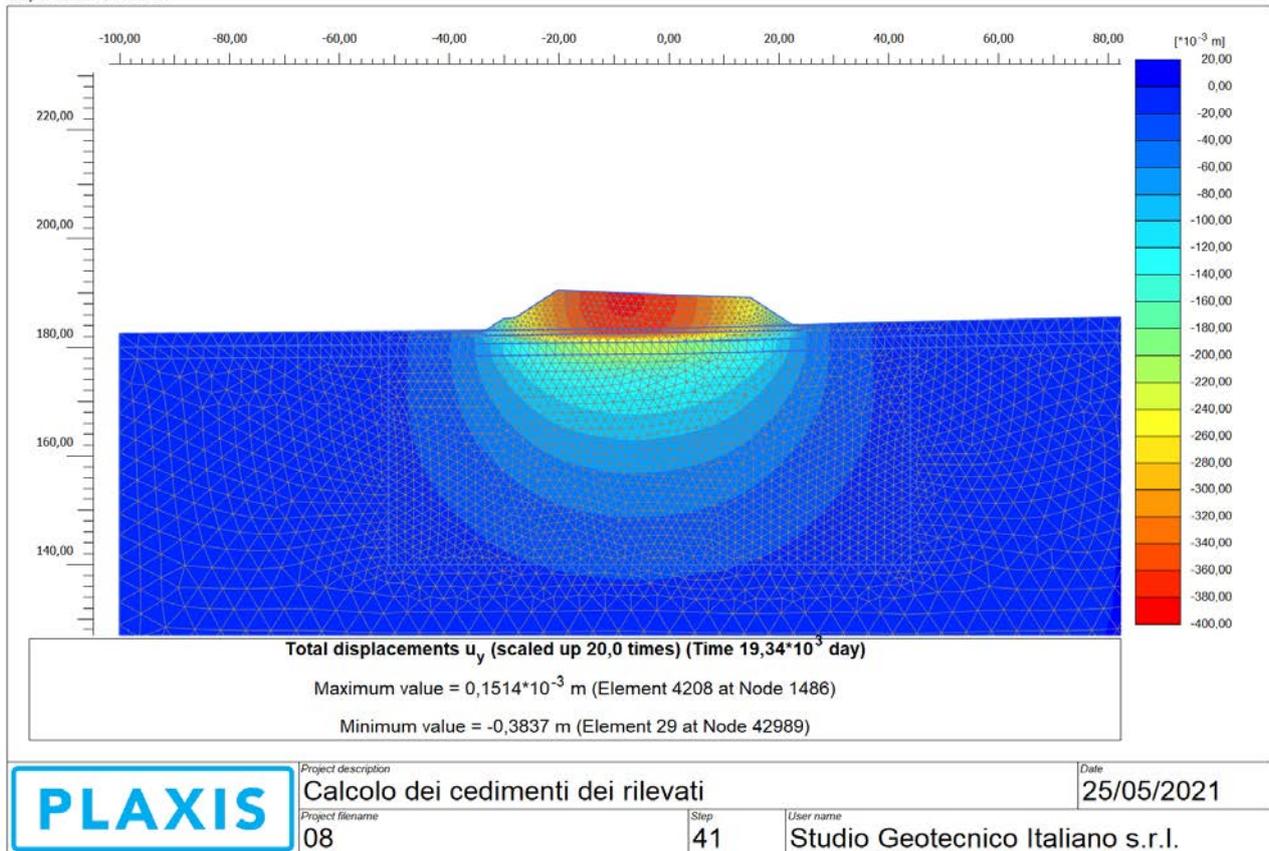


Figura 119 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 3+100 – cedimenti del modello a fine fase 5

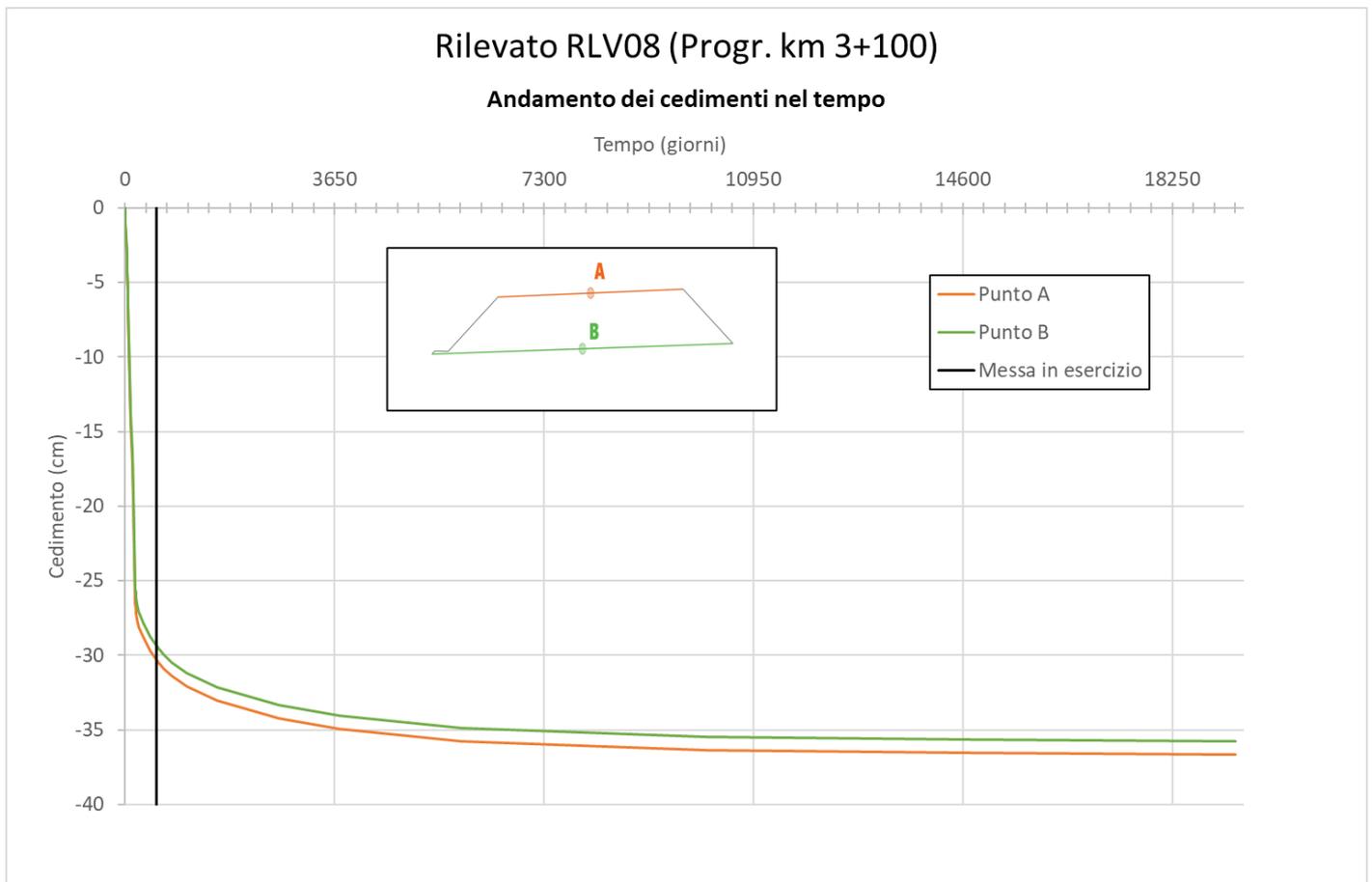


Figura 120 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 3+100 – andamento dei cedimenti nel tempo a partire dall'inizio della costruzione del rilevato (inizio fase 3) per i due punti in asse al rilevato alla base e al tetto dello stesso

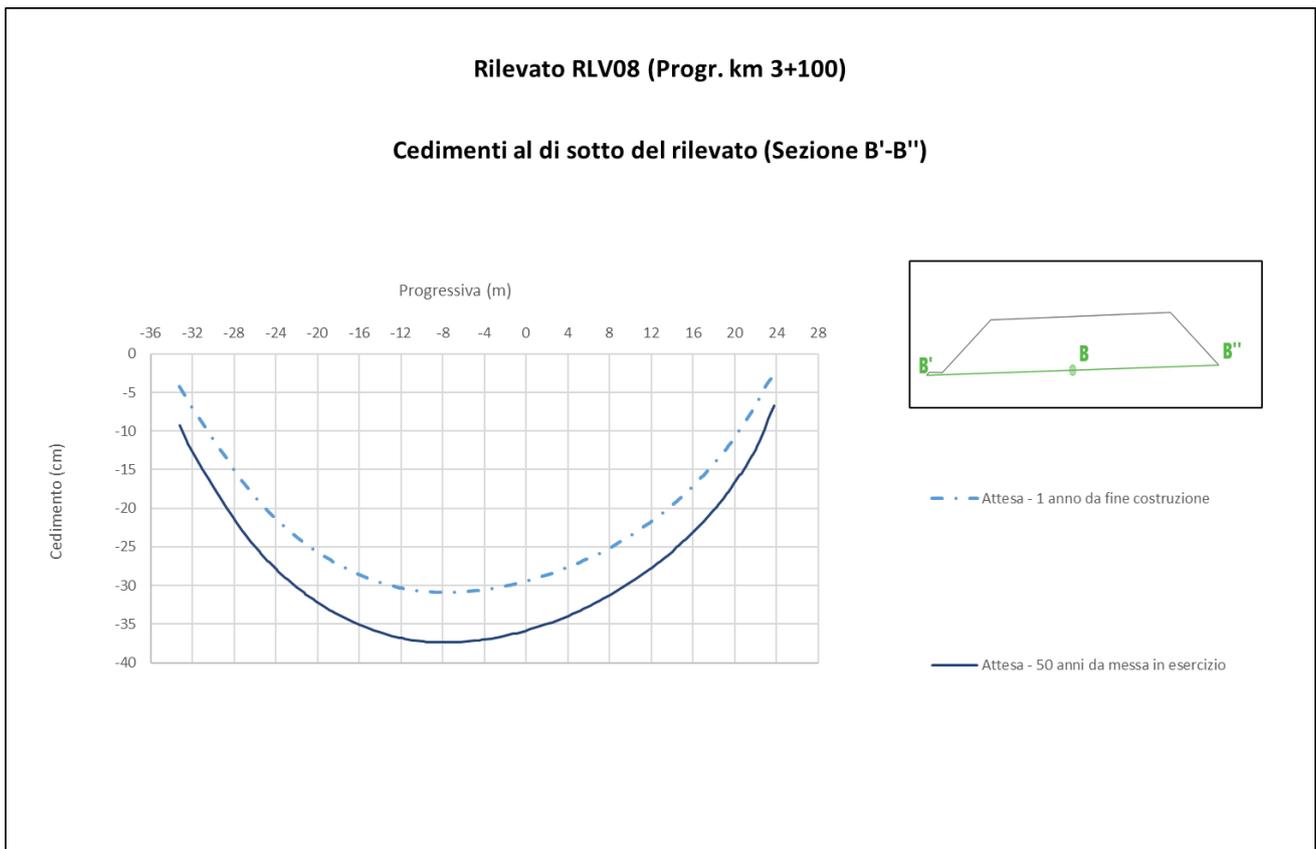


Figura 121 Modello PLAXIS con interventi – Sezione km 3+100 – andamento dei cedimenti alla base del rilevato agli istanti di tempo corrispondenti alla fine della fase 4 e alla fine della fase 5

14. MONITORAGGIO

14.1. FINALITÀ DEL MONITORAGGIO

Il monitoraggio geotecnico è finalizzato al controllo delle condizioni di sicurezza dell'opera ed alla verifica delle stime effettuate in fase di progettazione e riguarda:

- i tratti del tracciato in rilevato, per i quali risulta importante tenere sotto controllo i cedimenti del terreno indotti dalla realizzazione dell'opera;

Il monitoraggio viene eseguito in alcune sezioni di riferimento, collocate nelle aree più critiche, in termini di altezza dei rilevati, o in termini di caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione, ed in punti fisicamente accessibili.

La strumentazione di monitoraggio che verrà impiegata comprende:

- assestimetri a piastra
- capisaldi topografici

Tutti gli strumenti saranno installati e resi efficienti durante la fase di costruzione dell'opera stradale.

Le misure verranno conseguentemente impiegate dalla Direzione Lavori per le necessarie valutazioni.

14.2. MISURA DEGLI ASSESTAMENTI DEL TERRENO

14.2.1. Scopo

La misura degli assestamenti del terreno ha lo scopo di monitorare, attraverso l'installazione di piastre assestometriche, i cedimenti che si sviluppano nel terreno a seguito della costruzione del rilevato stradale. Nota la quota iniziale prima dell'inizio della costruzione con misure di livellazione successive si valuterà per differenza l'abbassamento progressivo dovuto ai riporti.

Tutte le misure dovranno essere riferite a capisaldi fissi esterni all'area di influenza del rilevato.

14.2.2. Descrizione della strumentazione e modalità di installazione

La strumentazione da porre in opera per il monitoraggio dei cedimenti del terreno sarà costituita da:

- assestimetri a piastra, disposti secondo una maglia regolare sulla sezione di monitoraggio;
- capisaldi topografici.

Contestualmente all'installazione della strumentazione verranno eseguite le necessarie livellazioni topografiche di precisione.

14.2.3. Frequenza dei rilevamenti

Le letture sugli strumenti avranno inizio al completamento dei rilevati nelle tratte oggetto di monitoraggio.

Dovrà essere effettuata una serie di almeno 4 letture di zero per ogni strumento, la cui media fungerà da riscontro per le misure successive.

Le misure andranno eseguite con cadenza mensile per i primi 12 mesi dal completamento della costruzione dei rilevati oggetto di monitoraggio, e con cadenza trimestrale per i 2 anni successivi.

In seguito alla rilevazione di fenomeni anomali si aumenterà opportunamente la frequenza di lettura della strumentazione.

14.2.4. Modalità di misura

Gli assestimetri a piastra verranno letti mediante livellazione rispetto ai capisaldi topografici installati.

14.2.5. Restituzione dati

L'elaborazione delle misure deve fornire le seguenti informazioni (in termini sia di diagrammi che di tabulati numerici):

- posizione in quota di tutti i punti di misura;
- variazione della quota altimetrica di tutti i punti di misura;
- differenza reciproca della quota altimetrica per tutti i punti di misura lungo un allineamento.

14.3. SEZIONI DI MONITORAGGIO

Nell'ambito del lotto di progetto è prevista una sezione tipologica per il monitoraggio dei rilevati. La sezione è riportata nella seguente

SEZIONE TIPOLOGICA MONITORAGGIO



Figura 122 Sezione tipologica monitoraggio rilevati

14.3.1. Sezione di monitoraggio tipo

La sezione di monitoraggio tipo 1 è finalizzata alla misura dei cedimenti dei rilevati, e prevede l'installazione di:

- n° 4 assestimetri a piastra
- n° 4 capisaldi topografici sulla testa degli assestimetri.

La sezione di monitoraggio verrà installata indicativamente alle progressive seguenti:

- Sezione SM-01: progressiva 0+100
- Sezione SM-02: progressiva 0+200
- Sezione SM-03: progressiva 0+725
- Sezione SM-04: progressiva 0+825
- Sezione SM-05: progressiva 1+200
- Sezione SM-06: progressiva 1+300
- Sezione SM-07: progressiva 1+400
- Sezione SM-08: progressiva 1+500
- Sezione SM-09: progressiva 1+600
- Sezione SM-10: progressiva 1+680
- Sezione SM-11: progressiva 1+720
- Sezione SM-12: progressiva 1+760
- Sezione SM-13: progressiva 2+000
- Sezione SM-14: progressiva 2+075
- Sezione SM-15: progressiva 2+100
- Sezione SM-16: progressiva 2+135
- Sezione SM-17: progressiva 2+300
- Sezione SM-18: progressiva 2+350
- Sezione SM-19: progressiva 2+400
- Sezione SM-20: progressiva 2+450
- Sezione SM-21: progressiva 2+880
- Sezione SM-22: progressiva 2+950
- Sezione SM-23: progressiva 3+050