

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



S.O. OPERE GEOTECNICHE

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA DI 2° FASE

RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA

Lotto 2

GEOTECNICA

Relazione di calcolo rilevati e trincee ferroviarie

SCALA:

-

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

RR0P 02 R 11 RH GE0006 001 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	V. Girardi	Mar. 2023	G. Meneschincheri	Mar. 2023	T. Paoletti	Mar. 2023	Ing. L. Berardi Lug. 2023
B	Emissione esecutiva	V. La Torre	Lug. 2023	G. Meneschincheri	Lug. 2023	T. Paoletti	Lug. 2023	

File: RR0P02R11RHGE0006001B.doc

n. Elab.:

INDICE

1.	PREMESSA.....	4
2.	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	6
2.1.	NORMATIVE E RACCOMANDAZIONI.....	6
2.2.	DOCUMENTI DI PROGETTO	6
2.3.	SOFTWARE	7
3.	INQUADRAMENTO GEOTECNICO E SISMICO.....	8
3.1.	Modello geotecnico	8
3.2.	Inquadramento sismico	8
3.2.1.	Vita Nominale, Classe d'Uso, Tempo di Ritorno	9
3.2.2.	Effetti di sito.....	11
4.	CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE.....	12
4.1.	Criteri generali di verifica.....	12
4.2.	Verifiche di sicurezza in campo statico per opere in materiali sciolti e fronti di scavo.....	13
4.2.1.	Stati limite ultimi (SLU)	13
4.2.2.	Stati limite di Esercizio (SLE)	14
4.3.	Verifiche di sicurezza in campo sismico per opere in materiali sciolti e fronti di scavo.....	14
4.3.1.	Stati limite ultimi (SLU) - Verifica allo stato limite SLV	14
4.3.2.	Coefficienti sismici per la verifica di stabilità globale allo SLV.....	15
5.	APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE GEOTECNICHE	17
5.1.	Approccio metodologico per le verifiche SLU ed SLV	17
5.1.1.	Equilibrio limite statico e pseudo-statico	17
5.2.	Approccio metodologico per le verifiche SLE	18
6.	CARATTERISTICHE DELLE OPERE.....	19
6.1.	Rilevati ferroviari	19
6.2.	Trincee ferroviarie	20
7.	CARICHI DI PROGETTO	21
8.	ANALISI DELLE SEZIONI DI CALCOLO.....	22
8.1.	Analisi Rilevato RI01 alla pk 0+700	22
8.1.1.	Analisi di Stabilità in Condizioni statiche e sismiche.....	22
8.1.2.	Verifica dei cedimenti (SLE)	24



RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA

Lotto 2

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE

Relazione di calcolo rilevati e trincee ferroviarie

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	PAG.
RROP	02	R 11	RH GE 00 06 001	B	3/27

8.2.	Analisi Rilevato RI02 alla pk 2+050	25
8.2.1.	Analisi di Stabilità in Condizioni statiche e sismiche.....	25
8.2.2.	Verifica dei cedimenti (SLE)	26

1. PREMESSA

Il raddoppio della tratta Decimomannu-Villamassargia si inserisce all'interno della linea sulla quale confluiscono i servizi Cagliari-Iglesias e Cagliari-Carbonia. L'intervento, previsto nell'ambito dell'Accordo Quadro TPL tra RFI e Regione Sardegna, si estende per circa 30 km e prevede la realizzazione del raddoppio di binario tra le due località di servizio e la soppressione dei passaggi a livello esistenti, creando le condizioni per il potenziamento del servizio ferroviario e per l'incremento dei livelli qualitativi del servizio e di regolarità.

L'intervento di raddoppio tra la stazione di Decimomannu e la stazione di Villamassargia è stato suddiviso in n°4 lotti funzionali.



Figura 1-1 - Raddoppio Decimomannu – Villamassargia- Suddivisione in tratte

Oggetto della presente relazione è il progetto di Fattibilità Tecnico Economica (PFTE) del Lotto 2 che rientra tra le opere finanziate con i fondi del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza. L'intervento consiste nel raddoppio in stretto affiancamento rispetto alla linea esistente tra le località di Villaspeciosa-Uta e Siliqua (stazione esclusa) per uno sviluppo complessivo di circa 5,5 km.

Il Lotto 2 è il primo lotto ad essere attivato e pertanto il progetto realizza il collegamento con la Linea Storica sia in direzione Decimomannu che in direzione Villamassargia mediante degli scambi posti ad inizio e fine tracciato, che consentono il passaggio dal nuovo doppio binario al singolo binario esistente. Il presente progetto di raddoppio risulta compatibile con la futura elettrificazione della linea prevista in altro appalto.

La successiva fase funzionale prevede la realizzazione del Lotto 1, che permetterà il raddoppio tra la stazione esistente di Decimomannu e la nuova fermata di Villaspeciosa-Uta. La realizzazione del lotto 1 e del lotto 2 consentirà il raddoppio ferroviario per uno sviluppo complessivo di circa 9 km.



Figura 1-2 - Raddoppio Decimomannu – Villamassargia – Lotto 1 e 2

Questa relazione si riferisce al calcolo dei rilevati e trincee ferroviarie.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	Relazione di calcolo rilevati e trincee ferroviarie	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RH GE 00 06 001	REV. B

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1. NORMATIVE E RACCOMANDAZIONI

- [1]. Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: "Aggiornamento delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni", G.U. n.42 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.8;
- [2]. Circolare del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 21 gennaio 2019, n. 7 del Consiglio superiore dei Lavori Pubblici recante "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018";
- [3]. RFI DTC SI CS MA IFS 001 F – Manuale di Progettazione delle Opere Civili. Parte II – Sezione 3 – Corpo stradale, 2023;
- [4]. RFI DTC SI CS MA IFS 001 F – Manuale di Progettazione delle Opere Civili. Parte II – Sezione 2 – Ponti e strutture, 2023;
- [5]. RFI DTC SI CS SP IFS 004 del 2023 - Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili 2023– Parte II – Sezione 5 – "Opere in terra e scavi" – RFI;
- [6]. UNI EN 1997-1: Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali;
- [7]. UNI EN 1998-5: Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

2.2. DOCUMENTI DI PROGETTO

- [8]. Relazione geotecnica generale - RR0P02R11GE0006001A
- [9]. Planoprofilo geotecnico - Tav. 1 - RR0P02R11L5GE0006001A
- [10]. Planoprofilo geotecnico - Tav. 2 - RR0P02R11L5GE0006002A
- [11]. Planoprofilo geotecnico - Tav. 3 - RR0P02R11L5GE0006003A
- [12]. Infrastruttura ferroviaria – Sezioni tipo ferroviarie – Sezione tipo raddoppio in rilevato in interruzione di esercizio – RR0P02R11WBIF0000001A
- [13]. Infrastruttura ferroviaria – Sezioni tipo ferroviarie – Sezione tipo raddoppio in trincea in interruzione di esercizio – RR0P02R11WBIF0000002A



RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA

Lotto 2

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE

Relazione di calcolo rilevati e trincee
ferroviarie

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	PAG.
RR0P	02	R 11	RH GE 00 06 001	B	7/27

[14]. Relazione tecnico-descrittiva delle Opere di sostegno – RR0P02R11RGMU0000001A

2.3. SOFTWARE

[15]. Slide 2D

[16]. Plaxis 2D

3. INQUADRAMENTO GEOTECNICO E SISMICO

3.1. Modello geotecnico

La caratterizzazione geotecnica di riferimento adottata nelle seguenti analisi fa riferimento alla Relazione Geotecnica (Doc. Rif. [8]). Per l'assetto stratigrafico si fa riferimento al profilo geotecnico (Doc. Rif. [9][10][11]), così come per la quota falda.

I parametri geotecnici delle unità intercettate lungo la tratta sono di seguito descritti:

Tabella 3.1: Sintesi parametri geotecnici caratteristici delle unità

Unità Geotecniche		Terreni granulari				
Unità	Unità Geologica	γ	E'	φ'	c'	k
		[kN/m ³]	[MPa]	[°]	[kPa]	[m/s]
DEP	Depositi alluvionali	19.5	15÷30	28÷35	-	2.00E-07

Unità Geotecniche		Roccia intatta			Ammasso											
Unità	Unità Geologica	σ_i	E_i	Poisson	γ	m_i	GSI	$\sigma_m (D=0.5)$	$E_m (D=0.5)$	c'	φ'	$\sigma_m (D=1)$	$E_m (D=1)$	c'	φ'	k
		MPa	GPa	-	kN/m ³	-	-	MPa	MPa	kPa	°	MPa	MPa	kPa	°	m/s
CIX	Formazione del Cixerri	35÷50	13 ÷ 20	0.25 ÷ 0.26	25.5 ÷ 26	7±2	20 ÷ 30	1.6 ÷ 2.3	230 ÷ 500	70	46	0.6 ÷ 1.0	200 ÷ 300	40	31	10-8
TON	Tonaliti di Monte Su Sillianu	45 ÷ 250	17 ÷ 90	0.15 ÷ 0.16	26.5 ÷ 26.8	20±3	25 ÷ 35	3.5 ÷ 5.8	600 ÷ 1000	110	55	1.5 ÷ 2.4	420 ÷ 550	60	45	10 ⁷ ÷ 10 ⁸

In accordo con quanto riportato nei Profili geotecnici di linea (Doc.Rif.[9],[9] e [10]), per le sezioni di calcolo, descritte al Cap.8, si considera la seguente stratigrafia dei terreni di fondazione:

Tabella 3.2: Stratigrafia terreni di fondazione

U.G.	Da (m)	a (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ' (°)	k (m/s)	E' (MPa)	ν (-)
DEP	0	In poi	19.5	0	31	1.0 E-7	25	0.30

La falda viene posta a -12.70 m da p.c. per la sezione di calcolo alla pk 0+700 e a -10.20 m da p.c. per la sezione alla pk 2+050.

3.2. Inquadramento sismico

L'azione sismica che governa il rispetto dei diversi Stati Limite per le strutture in progetto (di Esercizio – SLE e Ultimi - SLU) è qui definita in accordo alle Norme Tecniche 2018 (Doc. Rif. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) e relativa Circolare Esplicativa (Doc. Rif.[1]), a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione, espressa in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sottosuolo rigido, con superficie topografica orizzontale.

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	Relazione di calcolo rilevati e trincee ferroviarie	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RH GE 00 06 001	REV. B

La definizione dell'azione sismica include le ordinate dello spettro di risposta elastico di accelerazione $S_e(T)$ corrispondenti a prefissate probabilità di eccedenza PVR nel periodo di riferimento VR per la vita utile della struttura.

In sintesi, la forma degli spettri di risposta di progetto (considerati su sottosuolo rigido di riferimento) è definita dai seguenti parametri:

- a_g accelerazione orizzontale massima per 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.

Nei paragrafi seguenti verrà dapprima stabilito il periodo di riferimento per l'azione sismica (VR), in base alla classificazione delle opere in progetto.

3.2.1. Vita Nominale, Classe d'Uso, Tempo di Ritorno

La Vita Nominale V_N di un'opera, intesa come il periodo temporale entro cui l'opera stessa può essere usata per lo scopo al quale è destinata purché soggetta alla manutenzione ordinaria, è così definita dalle NTC2018:

- $V_N \leq 10$ anni, per opere provvisorie e opere provvisionali;
- $V_N \geq 50$ anni, per opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale;
- $V_N \geq 100$ anni, per grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di importanza strategica.

Lo stesso parametro, nel caso specifico di infrastrutture ferroviarie, può essere definito in riferimento al Manuale di Progettazione RFI (Doc.Rif.[4]):

TIPO DI COSTRUZIONE ⁽¹⁾	Vita Nominale V_N [Anni] ⁽¹⁾
OPERE NUOVE SU INFRASTRUTTURE FERROVIARIE PROGETTATE CON LE NORME VIGENTI PRIMA DEL DM 14.01.2008 A VELOCITÀ CONVENZIONALE ($V < 250$ Km/h)	50
ALTRE OPERE NUOVE A VELOCITÀ $V < 250$ Km/h	75
ALTRE OPERE NUOVE A VELOCITÀ $V \geq 250$ km/h	100
OPERE DI GRANDI DIMENSIONI: PONTI E VIADOTTI CON CAMPATE DI LUCE MAGGIORE DI 150 m	≥ 100 ⁽²⁾
<p>(1) – La stessa V_N si applica anche ad apparecchi di appoggio, coprigiunti e impermeabilizzazione delle stesse opere.</p> <p>(2) - Da definirsi per il singolo progetto a cura di FERROVIE.</p>	

Tab. 2.5.1.1.1-1 – Vita nominale delle infrastrutture ferroviarie

Nel caso in esame, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto è stato assunto in sede progettuale:

$$V_N = 75 \text{ anni}$$

Le opere sono suddivise dalle NTC2018 in classi d'uso, la cui appartenenza è stabilita sulla base dell'importanza dell'opera rispetto alle esigenze di operatività a valle di un evento sismico. In particolare, le classi d'uso sono così definite:

- Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli. Per le quali si ha un coefficiente d'uso $C_U = 0.7$.
- Classe II: ... *omissis* ... Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o Classe d'uso IV, salvo casi particolari per i quali sia necessaria la classe d'uso III o IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza ... *omissis* Per le quali $C_U = 1.0$.
- Classe III: ... *omissis* ... Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV, salvo casi particolari per i quali sia necessaria la classe d'uso IV, e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza ... *omissis* ... Per le quali $C_U = 1.5$.
- Classe IV: ... *omissis* ... Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade" e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico ... *omissis* ... Per le quali $C_U = 2$.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	Relazione di calcolo rilevati e trincee ferroviarie	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RH GE 00 06 001	REV. B

La classe d'uso, relativamente alle infrastrutture ferroviarie, può essere definita considerando quanto riportato nel Manuale di Progettazione RFI (Doc.Rif.[4]):

TIPO DI COSTRUZIONE	Classe d'uso ⁽¹⁾	Coefficiente d'uso [CU] ⁽¹⁾
FABBRICATI APPARTENENTI ALL'ELENCO A AI SENSI DEL DPCM 3685/2003	IV	2
GRANDI STAZIONI	IV	2
FABBRICATI APPARTENENTI ALL'ELENCO B AI SENSI DEL DPCM 3685/2003	III	1.5
OPERE D'ARTE DEL SISTEMA DI GRANDE VIABILITÀ FERROVIARIA ⁽²⁾	III	1.5
ALTRE OPERE D'ARTE, FABBRICATI NON RIENTRANTI NELLE CLASSI D'USO III E IV	II	1
<p>(1) Qualora una costruzione sia interferente con un'altra infrastruttura di cui all'elenco A del DPCM 3685 del 2003 o all'elenco B del DPCM 3685 del 2003 dovrà essere presa in conto la più alta tra la classe d'uso assegnata alla costruzione attraverso la presente tabella e quella dell'infrastruttura con cui si realizza l'interferenza.</p> <p>(2) Ricadono in classe d'uso IV le opere d'arte nuove ricadenti nelle tratte di nodo di collegamento delle grandi stazioni con il sistema di grande viabilità ferroviaria</p>		

Tabella 2.5.1.1.2-1 - Coefficienti d'uso per le infrastrutture ferroviarie

Nel caso in esame si assume:

Classe d'uso II ($C_U = 1.0$)

Pertanto, nel caso in esame, l'azione sismica di verifica viene associata ad un periodo di riferimento pari a:

$$V_R = V_N \times C_U = 75 \times 1.0 = 75 \text{ anni}$$

3.2.2. Effetti di sito

Per ulteriori dettagli circa l'inquadramento sismico, quali l'accelerazione di riferimento su suolo rigido, la risposta sismica locale (con particolare riferimento alla categoria di sottosuolo e al fattore di amplificazione sismica), si rimanda a quanto descritto nella Relazione Geotecnica generale (Doc. Rif.[8]). Per completezza, in riferimento alla categoria di sottosuolo tipo B, si riporta il fattore di sito S e l'azione sismica di progetto $a_{max} = S \cdot a_g$ ottenuti lungo il tracciato per il periodo di ritorno di interesse in questo documento (Tabella 3.3).

Tabella 3.3 Valori dei coefficienti di sito S e dell'accelerazione di progetto a_{max}

STATO LIMITE	Categoria sottosuolo	T_R , anni	a_g (g)	SS (-)	ST (-)	S (-)	a_{max} (g)
SLV	B	712	0.056	1.2	1.0	1.2	0.067

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	Relazione di calcolo rilevati e trincee ferroviarie	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RH GE 00 06 001	REV. B

4. CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE

4.1. Criteri generali di verifica

Per le opere in esame sono svolte le seguenti verifiche (par. 6.2.4. del Doc. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

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

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

$$E_d \leq R_d$$

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 del Doc. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

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

$$E_d \leq C_d$$

dove:

- E_d = valore di progetto dell'effetto delle azioni;
- 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.

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

In base a quanto indicato dalle NTC 2018 (Doc.Rif.**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), le verifiche di sicurezza che devono essere condotte per opere costituite da materiali sciolti e per i fronti di scavo sono le seguenti:

4.2.1. Stati limite ultimi (SLU)

Le verifiche di stabilità in campo statico di opere in materiali sciolti e fronti di scavo devono essere eseguite secondo il seguente approccio (Par. C.6.8.6 Doc.[1]):

Approccio 1 - Combinazione 2 - A2 + M2 + R2

tenendo conto dei coefficienti parziali sotto definiti.

La verifica di stabilità globale si ritiene soddisfatta se:

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

essendo R resistenza globale del sistema calcolata sulla base delle azioni di progetto, dei parametri di progetto e della geometria di progetto.

Facendo riferimento a quanto previsto al p.to 3.5.2.3.8 del Doc Rif.**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, per le verifiche agli stati limite ultimi si adottano i valori dei coefficienti parziali sulle azioni in Tabella 4.1 (Tab. 5.2.V del Doc.**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Tabella 4.1: coefficienti parziali sulle azioni (Tab. 5.2.I del Doc. Rif.Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.)

Tab. 5.2.V - Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU

Coefficiente			EQU ⁽¹⁾	A1	A2
Azioni permanenti	favorevoli	γ_{G1}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,10	1,35	1,00
Azioni permanenti non strutturali ⁽²⁾	favorevoli	γ_{G2}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Ballast ⁽³⁾	favorevoli	γ_B	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Azioni variabili da traffico ⁽⁴⁾	favorevoli	γ_Q	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,45	1,45	1,25
Azioni variabili	favorevoli	γ_{Qi}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Precompressione	favorevole	γ_P	0,90	1,00	1,00
	sfavorevole		1,00 ⁽⁵⁾	1,00 ⁽⁶⁾	1,00
Ritiro, viscosità e cedimenti non imposti appositamente	favorevole	γ_{Ce}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevole	d	1,20	1,20	1,00

In Tabella 4.1 il significato dei simboli è il seguente:

- γ_{G1} coefficiente parziale del peso proprio della struttura, del terreno e dell'acqua, quando pertinente;
- γ_{G2} coefficiente parziale dei pesi propri degli elementi non strutturali;
- γ_B coefficiente parziale del peso proprio del ballast;
- γ_Q coefficiente parziale delle azioni variabili da traffico;
- γ_{Qi} coefficiente parziale delle azioni variabili.

I coefficienti parziali sui materiali risultano i seguenti (Tab. 6.2.II del Doc. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

Tabella 4.2: coefficienti parziali sui terreni (M1 ed M2)

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

I coefficienti parziali sulle resistenze risultano i seguenti (Tab. 6.8.I del Doc. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

Tabella 4.3: coefficienti parziali sulle resistenze (R2)

Tab. 6.8.I - Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo

COEFFICIENTE	R2
γ_R	1.1

4.2.2. Stati limite di Esercizio (SLE)

Per i rilevati deve essere verificato che i cedimenti dell'opera siano compatibili con la funzionalità dell'infrastruttura. Devono essere valutati sia i cedimenti immediati, sia quelli residui dovuti agli effetti della consolidazione primaria ed eventualmente a quella secondaria, ed il loro andamento nel tempo, in funzione delle caratteristiche dei terreni di fondazione.

Nello specifico, come riportato nel Manuale di progettazione RFI (Doc. Rif. [3]), è stabilito, per i rilevati ferroviari, un valore soglia dei cedimenti residui attesi, valutati a far data dal completamento del piano di posa del ballast, per un intervallo di tempo pari almeno alla vita nominale, pari a 10 cm.

4.3. Verifiche di sicurezza in campo sismico per opere in materiali sciolti e fronti di scavo

4.3.1. Stati limite ultimi (SLU) - Verifica allo stato limite SLV

Per tutte le verifiche, l'azione sismica di progetto deve essere valutata sulla base degli Stati Limite relativi all'opera da verificare (vedasi Doc. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Per le opere in oggetto,

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	Relazione di calcolo rilevati e trincee ferroviarie	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RH GE 00 06 001	REV. B

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 la stabilità globale in condizioni sismiche delle opere in materiali sciolti, quali rilevati, e fronti di scavo che 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. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Come riportato al Par. 7.11.4 del Doc. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** le verifiche possono essere condotte mediante metodi pseudostatici.

Inoltre, in condizioni sismiche, il coefficiente di combinazione ψ per il carico variabile da traffico ferroviario, da utilizzare nelle verifiche agli stati limite ultimi, deve essere posto pari a 0.2.

4.3.2. Coefficienti sismici per la verifica di stabilità globale allo SLV

La verifica di stabilità globale va condotta mediante il metodo di analisi definito al Par. 7.11.4 del Doc. Rif.[1] inerente alla stabilità di Fronti di Scavo e Rilevati.

Parametri sismici di sito:

$C_U = 1.0$

$V_N = 75$ anni

$V_R = 75$ anni

T_r (SLV) = 712 anni

$a_g = 0.056g$

accelerazione massima attesa al sito su sottosuolo di riferimento

$S_S = 1.2$

coefficiente di amplificazione stratigrafico per terreno di categoria C

$S_T = 1.0$

coefficiente di amplificazione topografico per categoria T1

$a_{max} = 0.067g$

accelerazione massima attesa al sito

$\beta_S = 0.38$

coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

Si ottengono pertanto i seguenti coefficienti sismici:

Tabella 4.4: Coefficienti sismici per le verifiche di stabilità globale

a_{max} (g)	k_h	k_v
0.067	0.025	± 0.013



RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA

Lotto 2

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE

**Relazione di calcolo rilevati e trincee
ferroviarie**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	PAG.
RROP	02	R 11	RH GE 00 06 001	B	16/27

5. APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE GEOTECNICHE

5.1. Approccio metodologico per le verifiche SLU ed SLV

5.1.1. Equilibrio limite statico e pseudo-statico

Le verifiche geotecniche allo Stato Limite Ultimo riguardano il calcolo della stabilità globale di rilevati. Per tali opere sono state condotte verifiche sia in condizioni statiche, sia in condizioni sismiche.

L'esame delle condizioni di stabilità dei rilevati è stato condotto utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite. Il coefficiente di sicurezza a rottura lungo la superficie di scorrimento viene definito come rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie e quella effettivamente mobilitata:

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

Nel presente documento è stato utilizzato il modulo SLIDE 2D per condurre le analisi di stabilità, sia in campo statico sia in campo sismico (adottando il metodo pseudo-statico), per le verifiche richieste dalla Normativa per le opere in terreni sciolti e fronti di scavo.

Il codice SLIDE 2D utilizza i metodi 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.

In particolare, prevede il calcolo della stabilità per mezzo dei seguenti metodi:

- Metodo di Bishop semplificato;
- Metodo di Janbu semplificato;
- Metodo di Morgenstern & Price.

Tutti questi si basano sull'individuare una porzione di terreno instabile mobilitata lungo una potenziale superficie di scorrimento, suddividendo la regione di terreno mobilitata in conci verticali compresi tra la sommità del terreno e la superficie di scorrimento e applicando le condizioni di equilibrio generali e relative ai singoli conci (Metodo delle strisce). Poiché nella scrittura delle condizioni di equilibrio del singolo concio è necessario includere le azioni che esso scambia con i conci adiacenti, si ottiene un sistema risolvibile in cui le incognite (il coefficiente di sicurezza e le azioni interne fra i conci) superano le equazioni disponibili. La differenza fra i diversi metodi risiede nel modo in cui il problema viene reso staticamente determinato; in generale vengono introdotte ulteriori ipotesi, diverse da un metodo all'altro, relativamente alle azioni di interazione fra conci adiacenti.

Nelle analisi effettuate si è fatto riferimento al metodo di Morgenstern & Price che ipotizza che l'inclinazione delle forze tra i conci vari con la posizione x del concio, secondo una legge $f(x)$ nota a meno di un moltiplicatore λ introdotto come variabile aggiuntiva. Il coefficiente di sicurezza è ottenuto imponendo condizioni

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	Relazione di calcolo rilevati e trincee ferroviarie	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RH GE 00 06 001	REV. B

di equilibrio generali sia alla traslazione sia alla rotazione. Il metodo, inoltre, non richiede che la superficie di scorrimento sia un arco di cerchio.

Per la definizione delle superfici da analizzare, invece, SLIDE 2D offre la possibilità di scegliere tra le seguenti metodologie:

- Archi di cerchio aventi centro noto e raggi compresi in un intervallo;
- Archi di cerchio entranti e uscenti in posizioni note;
- Griglia dei centri e limiti geometrici sui raggi;
- Superficie di scorrimento generica definita tramite una spezzata.

Per le analisi dei rilevati e delle trincee è stato utilizzato il secondo metodo e pertanto è stato definito un intervallo di entrata (a monte), uno di uscita (a valle). Sulla base di questi intervalli il programma ha generato diversi archi di cerchio contraddistinti ovviamente da diversi centri. Sono state escluse, perché considerate non significative, le superfici di rottura corticali.

5.2. Approccio metodologico per le verifiche SLE

Le verifiche geotecniche allo Stato Limite di Esercizio hanno riguardato il calcolo dei cedimenti del rilevato ferroviario. A tal scopo sono state considerate le sezioni ritenute più rappresentative per la tratta in oggetto, descritte al Cap.8. In particolare, poiché il raddoppio avviene in interruzione di esercizio, è stato effettuato esclusivamente il calcolo del cedimento assoluto in asse alla nuova linea.

L'analisi è stata eseguita mediante modellazione FEM, adottando per i materiali in esame un legame costitutivo di tipo M-C, considerata la natura prevalentemente granulare degli stessi. Non sono pertanto state eseguite analisi di consolidazione.

Il calcolo dei cedimenti è svolto mediante 3 step di calcolo:

1. Inizializzazione dello stato tensionale nei terreni di fondazione mediante procedura K0, in assenza di rilevati;
2. Costruzione rilevato linea storica;
3. Costruzione nuovo rilevato;
4. Applicazione del carico dovuto al pacchetto di armamento ferroviario

Tra le fasi di costruzione del rilevato esistente ed il nuovo rilevato vengono resettati gli spostamenti, per l'azzeramento dei cedimenti pre-costruzione del nuovo rilevato. Il "Reset displacement" è applicato anche tra le Fasi 3 e 4 di calcolo, per azzerare i cedimenti pre-applicazione del ballast sul nuovo rilevato.

6. CARATTERISTICHE DELLE OPERE

6.1. Rilevati ferroviari

Per quanto riguarda la geometria dei rilevati vale quanto contenuto negli elaborati di progetto. In particolare, secondo quanto indicato dal Manuale di Progettazione RFI, i rilevati sono previsti realizzati con scarpate aventi pendenza 3H:2V, al di sotto del rilevato è stato previsto uno scotico per uno spessore pari a 0.5 m. Una volta completato il corpo del rilevato si posizioneranno ballast traverse e rotaie.

Le caratteristiche dei materiali di costruzione dei rilevati assunte in progetto sono conformi a quanto previsto nel Manuale di Progettazione RFI e nel Capitolato di Costruzione RFI.

Il materiale costituente il corpo del rilevato ferroviario è materiale a grana grossa con i valori minimi dei parametri caratteristici riportati nella tabella seguente in accordo a quanto stabilito da manuale di progettazione (Doc.Rif.[3])

Tabella 6.1: Parametri geotecnici per i rilevati ferroviari

Strato	γ	ϕ'	c'	E'
[-]	[kN/m ³]	[°]	[kPa]	[MPa]
Rilevati ferroviari di nuova realizzazione	19.5	38	0	30
Rilevati ferroviari esistenti	19.5	35	0	30

Nella figura seguente si riporta il tipologico del rilevato che verrà analizzato. Per quanto riguarda la sezione e lo schema con le geometrie e l'altezza di calcolo rappresentativi del lotto in oggetto si rimanda ai capitoli specifici di calcolo della presente relazione.

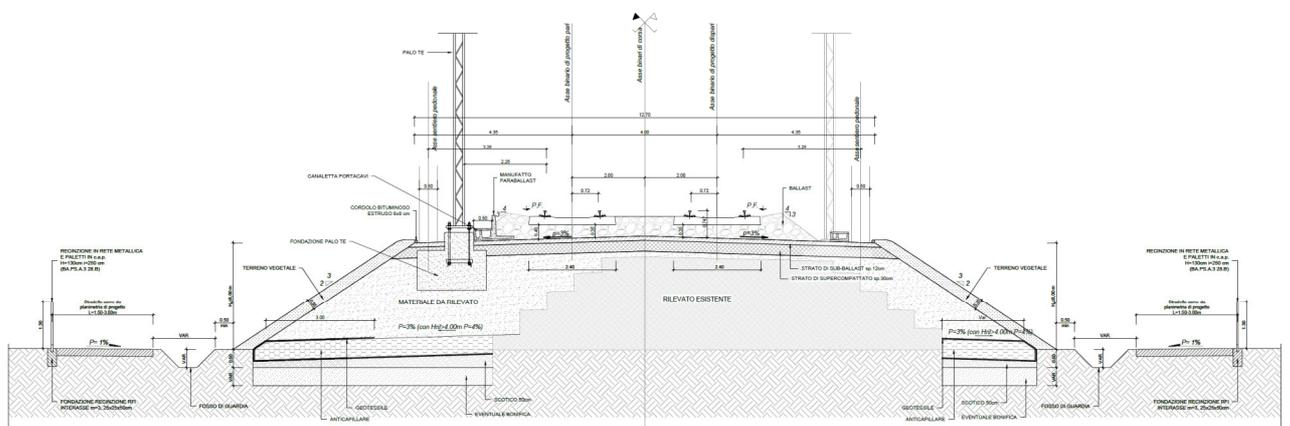


Figura 6.1 Sezione tipologica Raddoppio in Rilevato in interruzione di esercizio



RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA

Lotto 2

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE

Relazione di calcolo rilevati e trincee ferroviarie

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	PAG.
RROP	02	R 11	RH GE 00 06 001	B	20/27

6.2. Trincee ferroviarie

Per quel che riguarda la descrizione e la verifica delle trincee di linea si rimanda alla specifica Relazione tecnico-descrittiva delle Opere di Sostegno (Doc.Rif.[14]), in quanto le stesse, nelle sezioni più gravose sono sostenute da opere quali paratie di pali e muri. Le restanti trincee lungolinea mostrano altezze inferiori ai 2.00 m, in depositi dalle buone caratteristiche meccaniche e contesti topografici pressochè pianeggianti e pertanto non rilevanti dal punto di vista del calcolo in questa fase progettuale.

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	Relazione di calcolo rilevati e trincee ferroviarie	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RH GE 00 06 001	REV. B

7. CARICHI DI PROGETTO

I carichi di progetto considerati nelle analisi delle opere ferroviarie del presente documento sono i seguenti:

- Carico rappresentativo del pacchetto di armamento ferroviario (ballast, traversine, rotaie);
- Sovraccarico rappresentativo del traffico ferroviario: tale carico è considerato solamente nelle verifiche di stabilità globale SLU e SLV; nelle verifiche SLE, concordemente con quanto riportato nel manuale di progettazione RFI, non si considera il sovraccarico ferroviario;
- Azione sismica per le analisi di stabilità: tale carico è considerato solamente nelle verifiche dei rilevati allo SLV.

Per le verifiche SLU, l'armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di un'area trapezoidale ("region") di spessore 0.80 e peso pari a 18 kN/m^3 , come da Manuale di Progettazione (Doc. [3]). Tale scelta è volta ad evitare l'insorgenza di problematiche riscontrate nel software di calcolo Slide 2D nel momento in cui si introduce nella modellazione un doppio carico (armamento e traffico ferroviario) agente su una medesima area di impronta.

Per le verifiche SLE, il carico rappresentativo dell'armamento ferroviario viene schematizzato come un carico distribuito pari a $18 \text{ kN/m}^3 \cdot 0.80 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} = 14.4 \text{ kN/m}$.

Il carico da traffico ferroviario (q) è stato valutato, in accordo al Manuale di Progettazione (Doc. Rif. [3]), considerando il treno di carico LM71 (con $\alpha=1.1$). In particolare, si è fatto riferimento ai quattro assi da 250 kN disposti ad interasse di 1.60 m e pertanto si è considerato un carico di $\alpha \cdot Q_{vk}/i = 1.1 \cdot (4 \cdot 250) / (4 \cdot 1.6) = 171.88 \text{ kN/m}$.

Tale carico è stato applicato in corrispondenza della traversina, di larghezza pari a 2.4 m.

La pressione equivalente, centrata in corrispondenza dell'asse della linea ferroviaria, è pari a 71.61 kPa.

L'analisi di stabilità globale in campo sismico è stata condotta assumendo i carichi e i parametri geotecnici caratteristici.

Il sovraccarico (q) è stato moltiplicato per un coefficiente di combinazione $\psi=0.2$, pertanto:

$$q_{d2} = 0.2q_{k2} = 14.3 \text{ kPa.}$$

8. ANALISI DELLE SEZIONI DI CALCOLO

La tratta in oggetto si configura per tutta la sua estensione in un intervento di raddoppio ferroviario. Per la sezione tipologica di raddoppio in rilevato in interruzione di esercizio, si rimanda all'elaborato specifico [12]. Le verifiche descritte al Cap. 5 sono state effettuate su n°2 sezioni in corrispondenza del rilevato ferroviario:

- Sezione Raddoppio in rilevato in interruzione di esercizio alla pk 0+700 (RI01): $H_{\text{rilevato}}=2.3$ m;
- Sezione Raddoppio in rilevato in interruzione di esercizio alla pk 2+050 (RI02): $H_{\text{rilevato}}=3.6$ m.

8.1. Analisi Rilevato RI01 alla pk 0+700

Il rilevato in oggetto presenta un'altezza massima di 2.30 m ed è realizzato con scarpata di pendenza 3H:2V. Si precisa che l'altezza massima definita per il rilevato ferroviario si intende comprensiva di ballast. Per la sezione tipologica di riferimento si rimanda all'elaborato specifico (Doc.Rif.[12]).

La stratigrafia di riferimento, parametri geotecnici di riferimento e la posizione della falda di progetto vengono indicati al Cap.3.1.

I carichi di progetto sono indicati al Cap.7.

8.1.1. Analisi di Stabilità in Condizioni statiche e sismiche

Nelle seguenti figure, si riportano i risultati delle analisi e le immagini del modello con l'individuazione della superficie di scorrimento critica, sia in condizioni statiche che in condizioni sismiche.

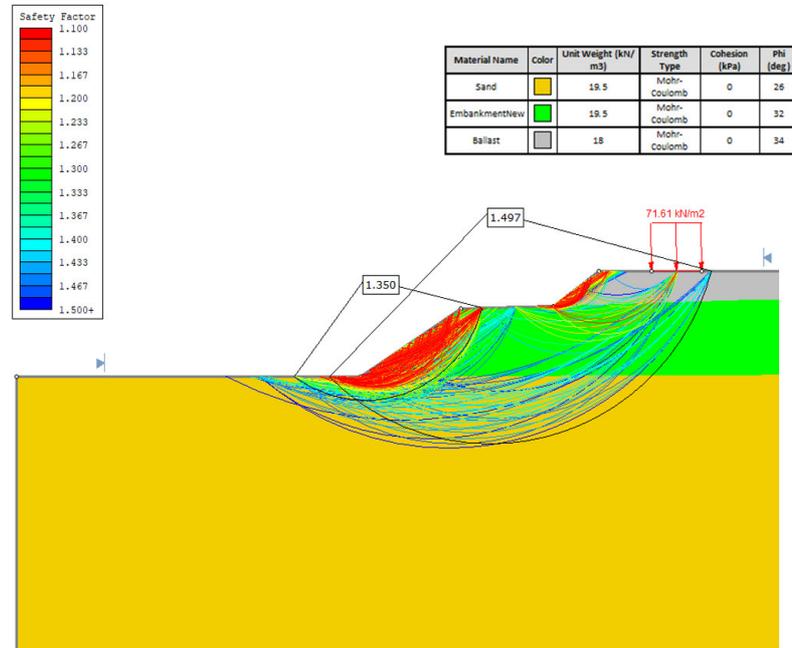


Figura 8.1 Verifica di stabilità del rilevato ferroviario alla pk 0+700 (hmax=2.3 m) in condizioni statiche

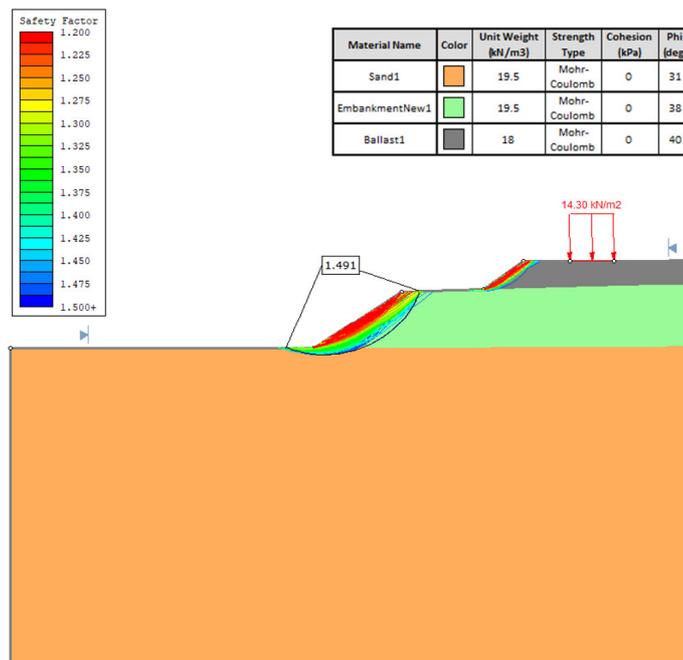


Figura 8.2 Verifica di stabilità del rilevato ferroviario alla pk 0+700 (hmax=2.3 m) in condizioni sismiche

Le verifiche di stabilità risultano soddisfatte, sia in condizioni statiche che in condizioni sismiche.

8.1.2. Verifica dei cedimenti (SLE)

Nel presente paragrafo viene riportato il calcolo dei cedimenti totali per la sezione di interesse, ottenuto applicando la procedura descritta al par.5.2.

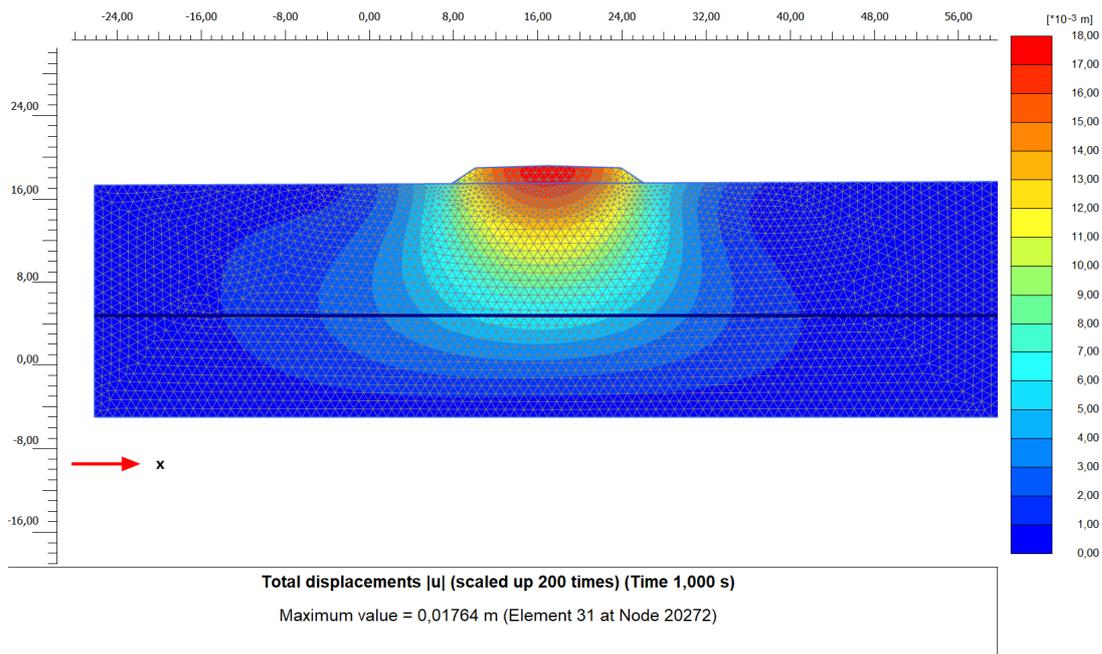


Figura 8.3 - Sezione alla pk 0+700: cedimenti al termine della costruzione del nuovo rilevato.

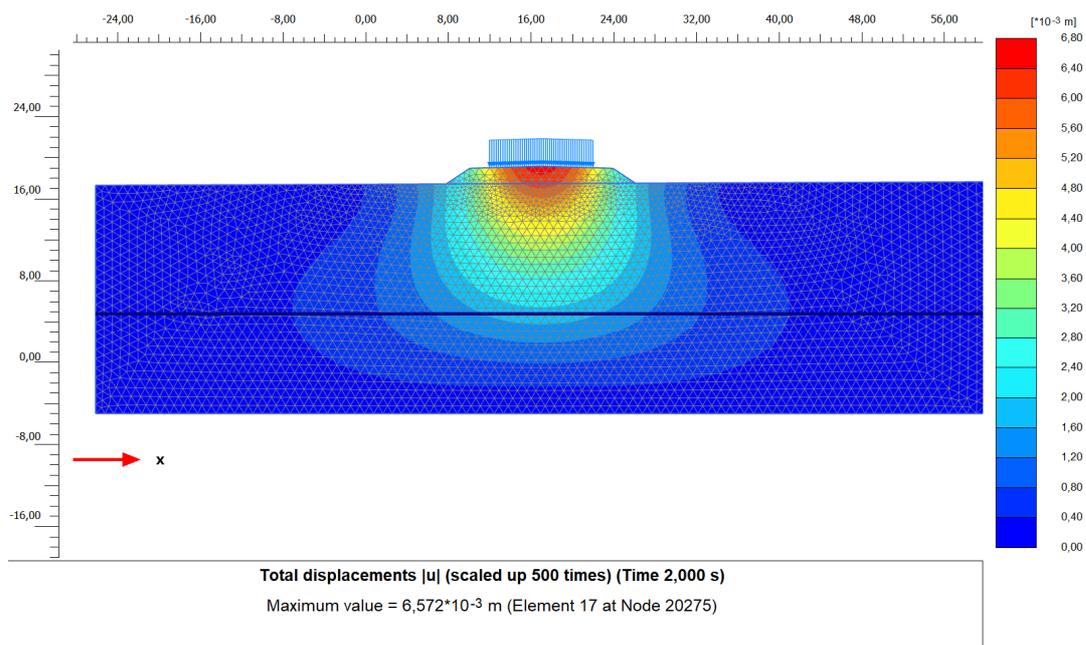


Figura 8.4 - Sezione alla pk 0+700: cedimenti dopo l'applicazione dell'armamento ferroviario.

Lo spostamento massimo dopo la fase di costruzione del nuovo rilevato è $S_{v,max}=1.76\text{cm}$, mentre a seguito dell'applicazione del carico corrispondente all'armamento ferroviario, il cedimento massimo è $S_{v,max}=6.5\text{mm}$. Esso, come richiesto dal Manuale di Progettazione, risulta inferiore ai 10 cm.

8.2. Analisi Rilevato RI02 alla pk 2+050

Il rilevato in oggetto presenta un'altezza massima di 3.6 m ed è realizzato con scarpata di pendenza 3H:2V. Si precisa che l'altezza massima definita per il rilevato ferroviario si intende comprensiva di ballast. Per la sezione tipologica di riferimento si rimanda all'elaborato specifico (Doc.Rif.[12]).

La stratigrafia di riferimento, parametri geotecnici di riferimento e la posizione della falda di progetto vengono indicati al Cap.3.1.

I carichi di progetto sono indicati al Cap.7.

8.2.1. Analisi di Stabilità in Condizioni statiche e sismiche

Nelle seguenti figure, si riportano i risultati delle analisi e le immagini del modello con l'individuazione della superficie di scorrimento critica, sia in condizioni statiche che in condizioni sismiche.

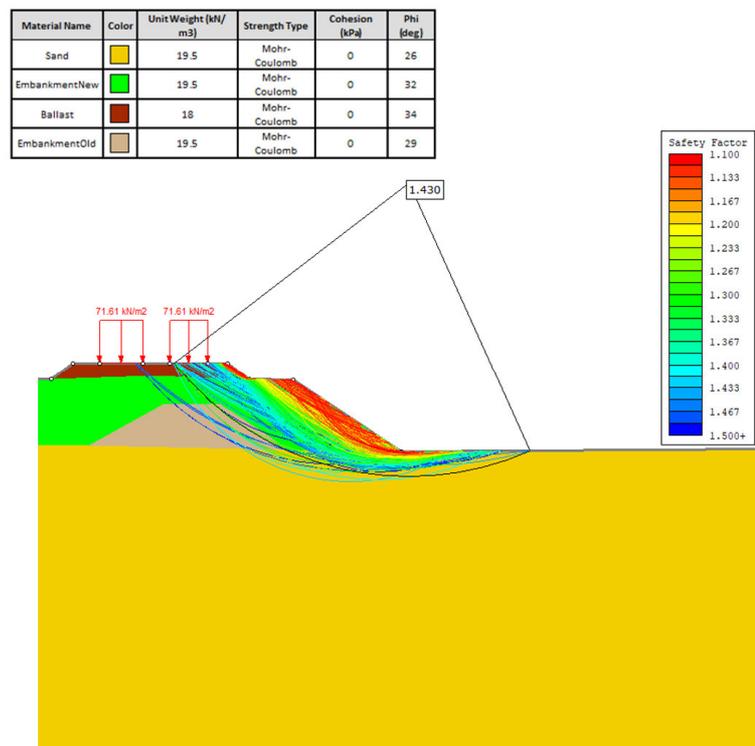


Figura 8.5 Verifica di stabilità del rilevato ferroviario alla pk 2+050 ($h_{max}=3.6\text{ m}$) in condizioni statiche

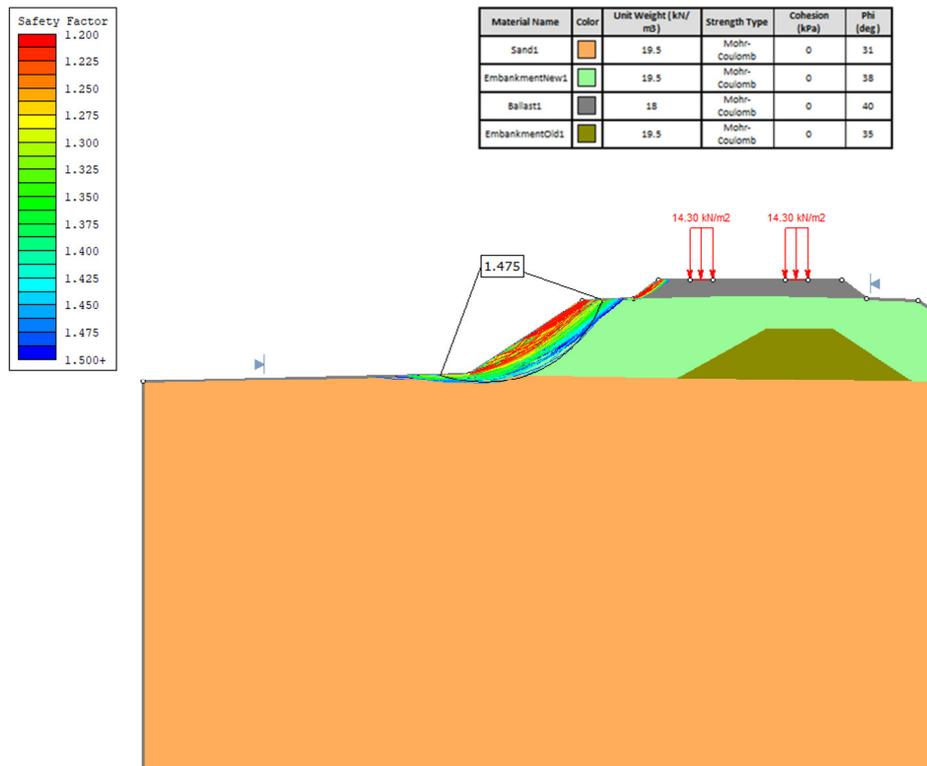


Figura 8.6 Verifica di stabilità del rilevato ferroviario alla pk 2+050 (hmax=3.6 m) in condizioni sismiche

Le verifiche di stabilità risultano soddisfatte, sia in condizioni statiche che in condizioni sismiche.

8.2.2. Verifica dei cedimenti (SLE)

Nel presente paragrafo viene riportato il calcolo dei cedimenti totali per la sezione di interesse, ottenuto applicando la procedura descritta al par. 5.2.

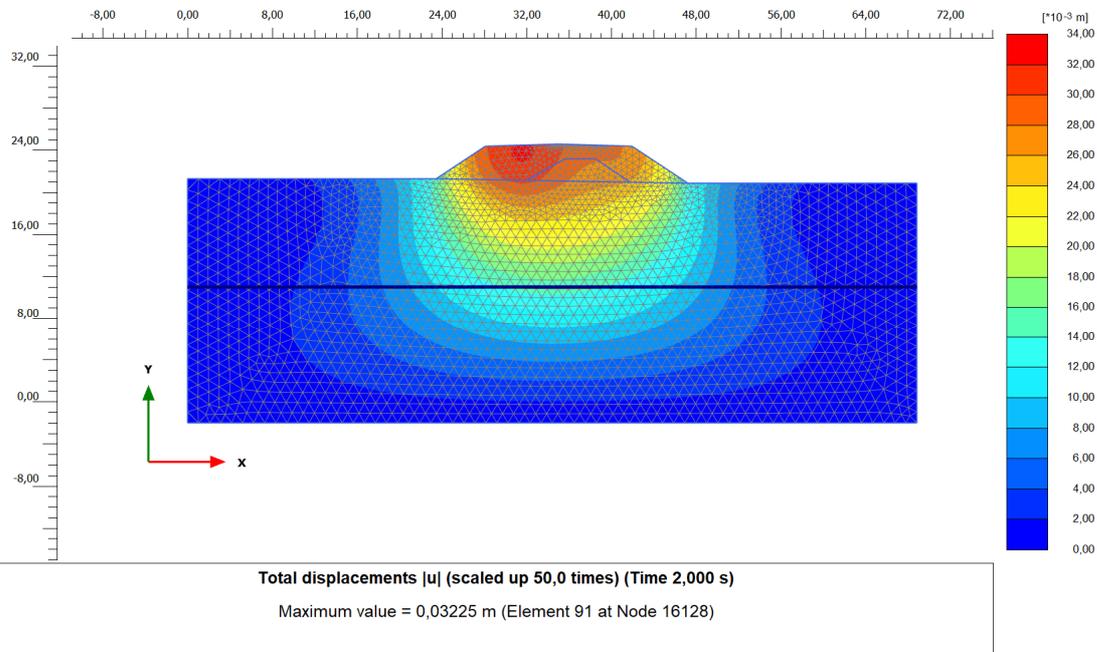


Figura 8.7 - Sezione alla pk 2+050: cedimenti al termine della costruzione del nuovo rilevato.

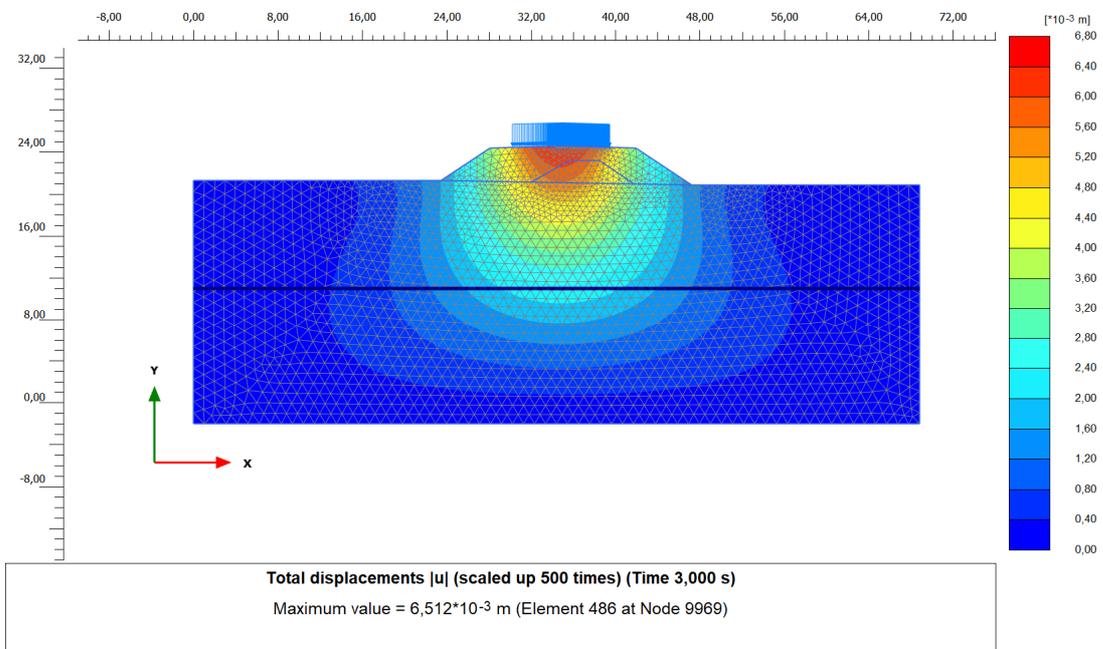


Figura 8.8 - Sezione alla pk 0+700: cedimenti dopo l'applicazione dell'armamento ferroviario.

Lo spostamento massimo dopo la fase di costruzione del nuovo rilevato è $S_{v,max}=3.2$ cm, mentre a seguito dell'applicazione del carico corrispondente all'armamento ferroviario, il cedimento massimo è $S_{v,max}=6.5$ mm. Esso, come richiesto dal Manuale di Progettazione, risulta inferiore ai 10 cm.