

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 stradali

SCALA:

-

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

RR0P 02 R 11 RH GE0006 002 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	F.Ravasi	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: RR0P02R11RHGE0006002B.doc

n. Elab.:

INDICE

1.	PREMESSA.....	3
2.	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	5
2.1.	NORMATIVE E RACCOMANDAZIONI.....	5
2.2.	DOCUMENTI DI PROGETTO	5
2.3.	SOFTWARE	5
3.	INQUADRAMENTO GEOTECNICO E SISMICO.....	6
3.1.	Modello geotecnico	6
3.2.	Inquadramento sismico	6
3.2.1.	Vita Nominale, Classe d'Uso, Tempo di Ritorno	7
3.2.2.	Effetti di sito.....	8
4.	CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE.....	9
4.1.	Criteri generali di verifica.....	9
4.2.	Verifiche di sicurezza in campo statico per opere in materiali sciolti e fronti di scavo.....	10
4.2.1.	Stati limite ultimi (SLU)	10
4.2.2.	Stati limite di Esercizio (SLE)	11
4.3.	Verifiche di sicurezza in campo sismico per opere in materiali sciolti e fronti di scavo.....	12
4.3.1.	Stati limite ultimi (SLU) - Verifica allo stato limite SLV	12
4.3.2.	Coefficienti sismici per la verifica di stabilità globale allo SLV.....	12
5.	APPROCCIO METODOLOGICO PER LE VERIFICHE GEOTECNICHE	14
5.1.	Approccio metodologico per le verifiche SLU ed SLV	14
5.1.1.	Equilibrio limite statico e pseudo-statico	14
5.2.	Approccio metodologico per le verifiche SLE	15
5.2.1.	Determinazione del volume significativo per il calcolo dei cedimenti.....	15
5.2.2.	Procedura di Calcolo	15
6.	CARATTERISTICHE DEI RILEVATI STRADALI	18
7.	CARICHI DI PROGETTO	19
8.	ANALISI RILEVATO STRADALE IN APPROCCIO AL CVF IV01	19
8.1.1.	Analisi di Stabilità in Condizioni statiche e sismiche.....	19
8.1.2.	Verifica dei cedimenti (SLE)	21

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 Villaspesiosa-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 Villaspesiosa-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 stradali.

 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 stradali	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RH GE 00 06 002	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 - RR0P02R11GEGE0006001A
- [9]. NV02 – Viabilità di ricucitura – Planoprofilo e tracciamento – RR0P02R13L6NV0200001A
- [10]. NV02 – Viabilità di ricucitura – Sezioni tipo – RR0P02R13WBNV0200001A
- [11]. Sezione geotecniche – Sezione IV01 – RR0P02R11WZGE0006001A

2.3. SOFTWARE

- [12]. SLOPE/W – Geostudio – www.geostudio.com

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 alla Sezione Geotecnica in corrispondenza della viabilità NV02 (Doc. Rif. [11]). La quota di falda, così come indicato nella Relazione Geotecnica (Doc.Rif.[8]), viene posizionata a -3.00 m da p.c., considerando la possibile formazione di un battente d'acqua nei depositi di copertura in corrispondenza di fenomeni piovosi intensi.

I parametri geotecnici delle unità intercettate lungo la tratta in esame 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	σ_m (D=0.5)	E_m (D=0.5)	c'	φ'	σ_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 Sixilianu	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 nella Sezione geotecnica (Doc.Rif.[11]), nelle analisi descritte nei successivi paragrafi, 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)	v (-)
DEP	0	-6.00	19.5	0	31	1.0 E-7	25	0.30
CIX	-6.00	In poi	25.5	40	31	1.0 E-8	200	0.25

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. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione, espressa in termini di accelerazione

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	Relazione di calcolo rilevati e trincee stradali	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RH GE 00 06 002	REV. B

orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sottosuolo rigido, con superficie topografica orizzontale.

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.

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 $C_U = 2$.

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. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). 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 Valori dei coefficienti di sito S e dell'accelerazione di progetto a_{max}** 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

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

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 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** (Tab. 5.1.V del Doc. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Tabella 4.1: coefficienti parziali sulle azioni (Tab. 5.1.V del Doc. Rif. Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.)

Tab. 5.1.V - Coefficienti parziali di sicurezza per le combinazioni di carico agli SLU

		Coefficiente	EQU ^①	A1	A2
Azioni permanenti g ₁ e g ₃	favorevoli	γ _{G1} e γ _{G3}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,10	1,35	1,00
Azioni permanenti non strutturali ^② g ₂	favorevoli	γ _{G2}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Azioni variabili da traffico	favorevoli	γ _Q	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,35	1,35	1,15
Azioni variabili	favorevoli	γ _{Qk}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Distorsioni e presollecitazioni di progetto	favorevoli	γ _{e1}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,00 ^③	1,00 ^④	1,00
Ritiro e viscosità, Cedimenti vincolari	favorevoli	γ _{e2}, γ_{e3}, γ_{e4}}}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,20	1,20	1,00

^① Equilibrio che non coinvolga i parametri di deformabilità e resistenza del terreno; altrimenti si applicano i valori della colonna A2.

^② Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali, o di una parte di essi (ad esempio carichi permanenti portati), sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

^③ 1,30 per instabilità in strutture con precompressione esterna

^④ 1,20 per effetti locali

In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** 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_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	γ_e'	1.0	1.25
Coesione efficace	γ_e'	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.

Nel caso dei rilevati stradali, in assenza di specifiche indicazioni nel Manuale di Progettazione, è stato assunto come valore ammissibile del cedimento residuo di 10 cm, cautelativamente in analogia ai rilevati ferroviari.

 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 stradali	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RH GE 00 06 002	REV. B

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, 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



RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA

Lotto 2

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE

Relazione di calcolo rilevati e trincee
stradali

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	PAG.
RROP	02	R 11	RH GE 00 06 002	B	13/22

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

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 SLOPE/W 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 SLOPE/W 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 stradali	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RH GE 00 06 002	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, SLOPE/W 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 stradali 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 stradale di approccio al cavalcaferrovia IV01.

L'analisi del cedimento dei rilevati stradali è stata effettuata utilizzando specifici fogli di calcolo.

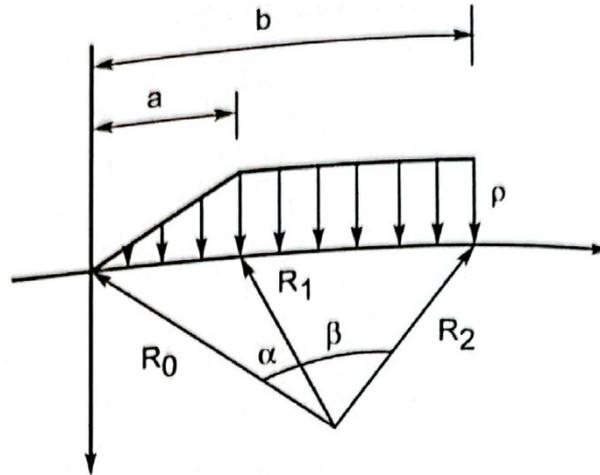
5.2.1. Determinazione del volume significativo per il calcolo dei cedimenti

I cedimenti indotti dalla realizzazione dei rilevati saranno ritenuti significativi in riferimento ad un preciso volume di interesse. Il limite in profondità di tale volume, infatti, viene definito a partire dalla teoria dell'elasticità, come successivamente descritto al par. 5.2.2. L'incremento tensionale e, quindi, i cedimenti indotti, dal rilevato di progetto possono ritenersi significativi fino ad una profondità per cui l'incremento delle tensioni verticali ($\Delta\sigma_z$) risulta pari a circa il 10% di σ'_z , dove σ'_z è la tensione verticale efficace litostatica.

5.2.2. Procedura di Calcolo

La valutazione dell'ordine di grandezza dei cedimenti può essere effettuata attraverso la teoria dell'elasticità. Facendo ricorso alla teoria del semispazio elastico, omogeneo ed isotropo, è possibile definire, in ogni punto del sottosuolo e per il previsto schema di carico, i valori delle corrispondenti tensioni indotte. Il corpo di carico del rilevato può essere suddiviso come in Figura 5.1:

Figura 5.1: Carico del rilevato suddiviso in corpi di carico



Con tale modello le espressioni delle tensioni indotte dalla singola porzione di carico possono essere determinate in forma chiusa:

$$\Delta\sigma_z = \frac{p}{\pi} \left[\beta + \frac{x\alpha}{a} - \frac{z}{R_2^2} (x-b) \right]$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{p}{\pi} \left[\beta + \frac{x\alpha}{a} + \frac{z}{R_2^2} (x-b) + \frac{2z}{a} \log \frac{R_1}{R_0} \right]$$

$$\Delta\sigma_y = \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_z)$$

Ricavati, ad ogni profondità z , i valori di $\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$ e $\Delta\sigma_z$, dovuto alla sovrapposizione degli effetti dei singoli corpi di carico, è possibile ricavare, noti i valori del modulo di deformabilità E e del coefficiente di Poisson ν , il corrispondente valore della deformazione ϵ_z attraverso l'espressione:

$$\epsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_y + \Delta\sigma_x)}{E}$$

Suddividendo i terreni di fondazione in strati di spessore Δz_i , è possibile determinare il valore del cedimento dello strato i -esimo attraverso l'espressione:

$$\delta_{z_i} = \frac{\Delta\sigma_{z_i} - \nu(\Delta\sigma_{y_i} + \Delta\sigma_{x_i})}{E_i} \Delta z_i$$

Il cedimento complessivo sarà pari alla somma dei cedimenti di singoli strati e quindi pari a:

$$\delta z_j = \sum_i \delta z_i = \sum_i \frac{\Delta \sigma_{zi} - v(\Delta \sigma_{yi} + \Delta \sigma_{xi})}{E_i} \Delta z_i$$

Se, come nel caso in esame, i terreni di fondazione sono costituiti da n strati, il cedimento complessivo è pari alla somma dei cedimenti dei singoli strati:

$$\delta_{tot} = \sum_j \delta_{zj}$$

Il calcolo viene esteso a tutto il volume significativo ai fini del calcolo dei cedimenti, così come definito al par. 5.2.1.

Il cedimento totale così calcolato può essere suddiviso in due aliquote, ossia cedimento immediato e cedimento di consolidazione. Quest'ultimo, legato al processo di dissipazione delle sovrappressioni neutre indotte dai carichi applicati (processo di consolidazione), si esplica in un arco temporale più o meno lungo, in relazione allo spessore e alle caratteristiche di permeabilità e rigidità degli strati interessati.

Nel caso in esame, date le peculiarità delle unità stratigrafiche e visti, in particolare, i valori di permeabilità attesi (vedasi Relazione geotecnica generale, Doc. Rif. [8], per approfondimenti), la consolidazione risulta molto rapida e, dunque, il cedimento totale di fatto coinciderà con la sola aliquota di cedimento immediato.

6. CARATTERISTICHE DEI RILEVATI STRADALI

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.

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 stradale è materiale a grana grossa con i valori minimi dei parametri caratteristici riportati nella tabella seguente in accordo a quanto stabilito dal Manuale di Progettazione (Doc.Rif.**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**)

Tabella 6.1: Parametri geotecnici per i rilevati stradali

Strato	γ	ϕ'	c'	E'
[-]	[kN/m ³]	[°]	[kPa]	[MPa]
Rilevati stradali di nuova realizzazione	20	35	0	30

	RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA Lotto 2 PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA DI 2° FASE					
	Relazione di calcolo rilevati e trincee stradali	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RH GE 00 06 002	REV. B

7. CARICHI DI PROGETTO

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

- Sovraccarico rappresentativo del traffico stradale di 20 kPa: tale carico è considerato solamente nelle verifiche di stabilità globale SLU e SLV dei rilevati; nelle verifiche SLE non si considera tale sovraccarico;
- Azione sismica per le analisi di stabilità: tale carico è considerato solamente nelle verifiche dei rilevati allo SLV.

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

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

$$q_{d2} = 0.2q_{k2} = 4 \text{ kPa.}$$

8. ANALISI RILEVATO STRADALE IN APPROCCIO AL CVF IV01

La sezione più critica ai fini della verifica dei cedimenti e di stabilità è la Sez. 13 della viabilità NV02. Viene analizzato il rilevato, in corrispondenza della pk. 4+150 della nuova viabilità, con altezza di circa 6,0 sul p.c. una larghezza di circa 14,0 metri in corrispondenza del piano stradale ed una larghezza di circa 35 m al p.c.

Alle scarpate del rilevato viene conferita una pendenza 2H:3V.

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

I carichi di progetto sono, invece, 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.

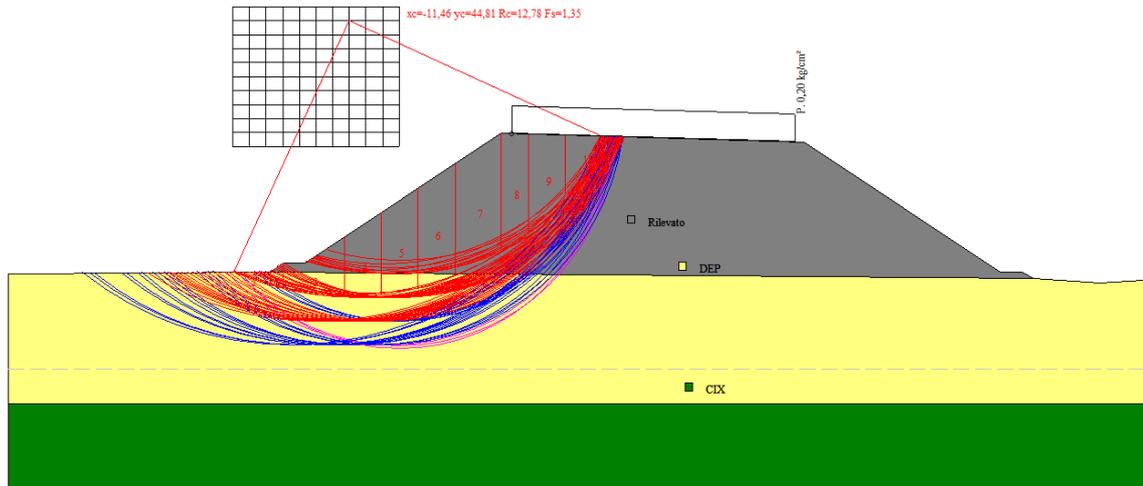


Figura 8.1 Verifica di stabilità del rilevato stradale di appoggio al cavalcaferrovia NV02 in condizioni statiche ($FS_{MIN}=1.35$)

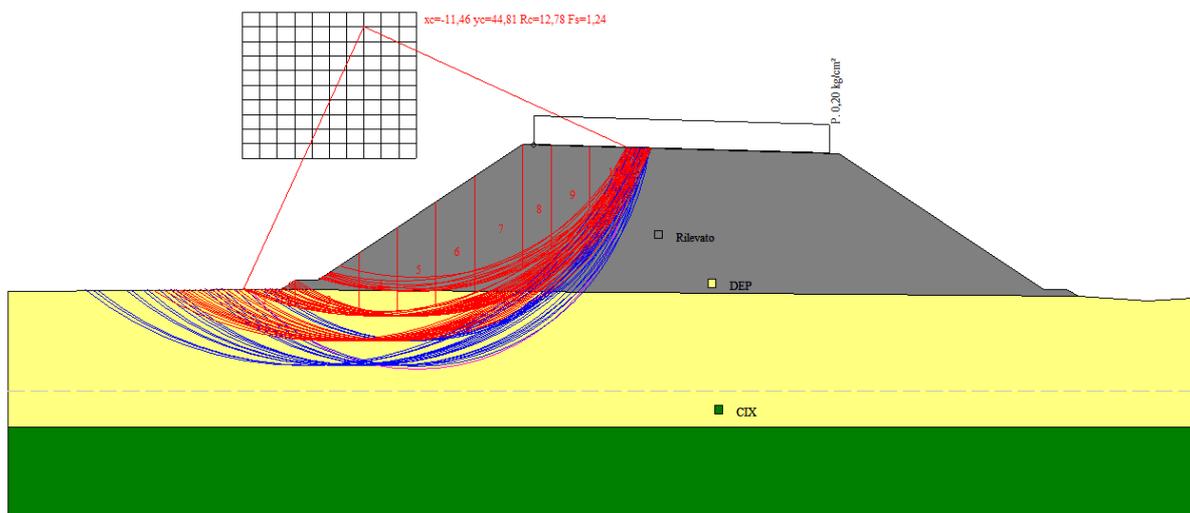


Figura 8.2 Verifica di stabilità del rilevato stradale di appoggio al cavalcaferrovia NV02 in condizioni sismiche ($FS_{MIN}=1.24$)

Le verifiche di stabilità risultano ampiamente 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.

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RILEVATO

h (altezza del rilevato):	6,00	(m)
a (larghezza scarpata sinistra):	9,00	(m)
a' (larghezza scarpata destra):	9,00	(m)
b (larghezza coronamento del rilevato):	14,00	(m)
γ_R (peso di unità di volume del rilevato):	20,00	(kN/m ³)

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

n (numero degli strati) (max 5):	2	(-)
$\Delta\sigma_m/\sigma_{m0}$:	1	(%)
(Rapp. Tensione media indotta nel sottosuolo e tensione efficace media)		
Zw (Profondità della falda):	10,50	(m)

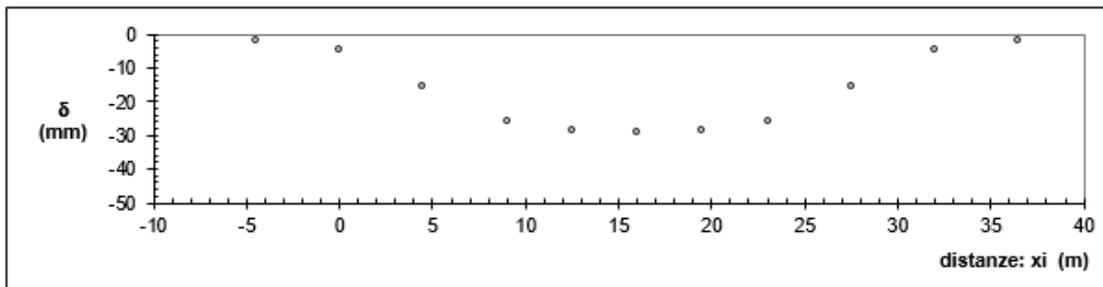
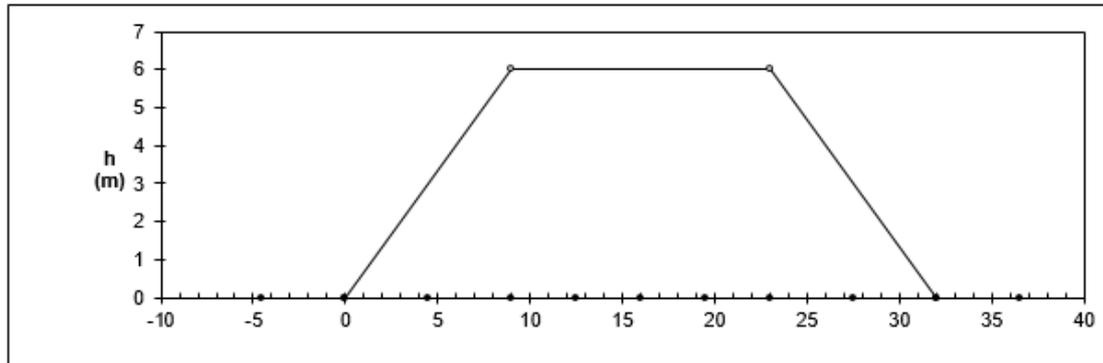
Strato (n)	Z _{iniziale} (m)	Z _{finale} (m)	Spessore (m)	Δz_i (m)	E (Mpa)	ν (-)	ϕ' (°)	γ (kN/m ³)	terreno
1	0,00	6,00	6,00	1,0	25,0	0,30	31,0	19,50	DEP
2	6,00	39,00	33,00	1,0	200,0	0,25	31,0	25,50	CIX
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ASCISSE DI CALCOLO

x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
-4,50	0,00	4,50	9,00	12,50	16,00	19,50	23,00	27,50	32,00	36,50

(automatico)
(manuale)

RISULTATI DELLE ANALISI



ASCISSE DI CALCOLO

x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
-4,50	0,00	4,50	9,00	12,50	16,00	19,50	23,00	27,50	32,00	36,50

CEDIMENTI

delta1	delta2	delta3	delta4	delta5	delta6	delta7	delta8	delta9	delta10	delta11
(cm)	(cm)									
-0,17	-0,46	-1,54	-2,61	-2,85	-2,89	-2,85	-2,61	-1,54	-0,46	-0,17

Figura 8.3 - Cedimenti Rilevato in approccio al cavalcaferrovia della NV02

Il cedimento massimo totale in asse al nuovo rilevato stradale sarà inferiore a 2.00 cm. Per le considerazioni fatte al cap. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, esso si esaurisce contestualmente alla realizzazione dell'opera ed è pertanto da ritenersi immediato, quindi ammissibile in quanto direttamente recuperabile in fase di rifinitura del manufatto.