

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



CUP: J64H17000140001

U.O. PROGETTAZIONE INTEGRATA NORD

PROGETTO DEFINITIVO

RADDOPPIO PONTE S. PIETRO – BERGAMO – MONTELLO

LOTTO 9: Opere Civili e Impianti Tecnologici di Piazzale per il completamento del raddoppio della linea Ponte SP – Bergamo e per lo spostamento provvisorio della linea Treviglio - Bergamo.

CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA INTERVENTO

Relazione di calcolo stabilità rilevati esistenti

SCALA:

-

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

N B 1 R 0 9 D 2 6 C L R I 0 0 0 4 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	A. Maran	Luglio 2021	A. Maran	Luglio 2021	M. Berlingeri	Luglio 2021	A. Perego Luglio 2021



File: NB1R09D26CLRI0004001A.docx

n. Elab.:

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	4
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	5
2.1 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO E DI BASE.....	5
2.2 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO.....	5
2.3 SOFTWARE.....	6
3. CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE.....	7
3.1 CRITERI GENERALI DI VERIFICA.....	7
3.2 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI.....	8
3.2.1 <i>Stati limite ultimi (SLU)</i>	8
3.2.2 <i>Stati limite di esercizio (SLE)</i>	11
3.3 STABILITÀ DEL SITO NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE.....	11
3.4 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI.....	12
3.4.1 <i>Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche</i>	12
3.4.2 <i>Stati limite ultimi (SLU)</i>	14
3.4.3 <i>Stati limite di esercizio (SLE)</i>	14
4. AZIONE SISMICA DI PROGETTO E VALUTAZIONE NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE.....	16
4.1 DETERMINAZIONE DELL'AZIONE SISMICA.....	16
4.2 COMPONENTI DELL'ACCELERAZIONE EQUIVALENTE.....	18
4.3 SINTESI DELLE VERIFICHE A LIQUEFAZIONE.....	19
5. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA.....	20
5.1 CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI.....	20
5.1.1 <i>Slope/W</i>	20
5.2 METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE.....	20
5.2.1 <i>Verifiche di stabilità</i>	20
6. CARATTERISTICHE DEL CORPO STRADALE FERROVIARIO.....	22

Relazione di calcolo stabilità rilevati esistenti

COMMESSA NB1R	LOTTO 09 D26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0004 001	REV. A	FOGLIO 3 di 31
------------------	-----------------	----------------	-------------------------	-----------	-------------------

6.1	DESCRIZIONE DELLA SEZIONE DI VERIFICA.....	22
6.2	MATERIALI COSTITUENTI IL RILEVATO E LA SEDE FERROVIARIA.....	23
6.3	CARICHI DI PROGETTO	23
7.	RISULTATI DELLA SEZIONE DI VERIFICA.....	25
7.1	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO	25
7.2	VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE	26
7.2.1	<i>Verifiche SLU in condizioni statiche.....</i>	26
7.2.2	<i>Verifiche SLU in condizioni sismiche.....</i>	27

1. INTRODUZIONE

La presente relazione ha per oggetto le verifiche di stabilità dei rilevati ferroviari esistenti che ricadono nell'ambito del Lotto 9 dell'intervento di raddoppio della linea Ponte S. Pietro – Bergamo – Montello, nel tratto da Curno a Bergamo.

Nello specifico il presente documento riporta le verifiche relative alle sezioni caratteristiche dei tratti in rilevato in presenza del carico assiale tipo D4, eseguite ai sensi della Normativa vigente (Doc. Rif.[3] e [4]).

Il documento è così articolato:

- Nel Cap. 2 si riportano i documenti di riferimento e la normativa citati nel testo.
- Nel Cap. 3 si descrivono i criteri generali di progettazione in accordo alla Normativa vigente (Doc. Rif.[3] e [4]).
- Nel Cap. 4 si definiscono l'azione sismica di progetto e la valutazione del sito nei confronti della liquefazione.
- Nel Cap. 5 si descrivono i codici di calcolo ed i criteri di verifica adottati.
- Nel Cap. 6 si riportano la descrizione del corpo ferroviario in esame da un punto di vista geometrico, le caratteristiche geotecniche dei materiali costituenti il rilevato ed i sovraccarichi da applicare.
- Nel Cap. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e nel Cap. 7 si riportano, per le sezioni caratteristiche selezionate per la tratta in esame, i dati geotecnici di calcolo, le descrizioni delle verifiche condotte ed i risultati ottenuti.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO LOTTO 9 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA INTERVENTO					
	Relazione di calcolo stabilità rilevati esistenti	COMMESSA NB1R	LOTTO 09 D26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0004 001	REV. A

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Documentazione di progetto e di base

Si riporta di seguito l'elenco dei documenti utilizzati per la stesura della presente relazione:

- [1] Progetto Definitivo – Relazione geotecnica generale (Doc. rif. - NB1R09D26GEGE0005001).
- [2] Progetto Definitivo – Profilo geotecnico (Doc. rif. – NB1R09D26F6GE0005001).

2.2 Normativa e standard di riferimento

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

- [3] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: “Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n.29 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.30.
- [4] 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”.
- [5] RFI DTC SI MA IFS 001 C del 21.12.2018- “MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI”.
- [6] RFI DTC INC CS LG IFS 001 A del 21.12.2011 – “Linee guida per il collaudo statico delle opere in terra”.
- [7] RFI DTC SI SP IFS 001 C del 21.12.2018- Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Parte II – Sezione 5 – “Opere in terra e scavi”– RFI.
- [8] Regolamento (UE) N.1299/2014 della Commissione del 18 Novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario dell’Unione europea modificato dal Regolamento di esecuzione (UE) N° 2019/776 della Commissione del 16 Maggio 2019.
- [9] UNI EN 1997-1 : Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali

- [10] UNI EN 1998-5 : Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

2.3 Software

- [12] SlopeW – GeoSlope (www.geo-slope.com).
- [13] PLAXIS B.V.. “Plaxis – Finite Element Code for Soil and Rock Analyses”. Plaxis 2D – AE.02. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherland. ([http:// w.plaxis.nl](http://w.plaxis.nl)).

3. CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE

3.1 Criteri generali di verifica

Per le opere in esame devono essere svolte le seguenti verifiche di sicurezza e delle prestazioni attese (par. 6.2.3. del Doc. Rif. [3]):

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

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

$$E_d \leq R_d \quad (\text{Eq. 6.2.1 del Doc. Rif. [3]})$$

dove:

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

R_d = valore di progetto della resistenza.

La verifica della condizione $E_d \leq R_d$ deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni ($A1$ e $A2$), per i parametri geotecnici ($M1$ e $M2$) e per le resistenze ($R1$, $R2$ e $R3$). I coefficienti da adottarsi nelle diverse combinazioni sono definiti in funzione del tipo di verifica da effettuare (si vedano i paragrafi seguenti). Si sottolinea che per quanto concerne le azioni di progetto E_d tali forze possono essere determinate applicando i coefficienti parziali di cui sopra alle azioni caratteristiche, oppure, a posteriori, sulle sollecitazioni prodotte dalle azioni caratteristiche (Par. 6.2.3.1 del Doc. Rif.[3]).

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

$$E_d \leq C_d \quad (\text{Eq. 6.2.7 del Doc. Rif. [3]})$$

dove:

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

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

La verifica della condizione $E_d \leq C_d$ deve essere effettuata impiegando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici dei materiali.

3.2 Verifiche di sicurezza in campo statico per opere in materiali sciolti

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

3.2.1 Stati limite ultimi (SLU)

Le verifiche di stabilità in campo statico di opere in materiali sciolti, quali rilevati, devono essere eseguite secondo il seguente approccio (Par. 6.8.2 del Doc. Rif.[3]):

Approccio 1:

- Combinazione 2 : A2 + M2 + R2

tenendo conto dei coefficienti parziali sotto definiti.

La verifica di stabilità globale si ritiene soddisfatta se:

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

essendo R resistenza globale del sistema (Par. C.6.8.6.2 del Doc. Rif.[4]), calcolata sulla base delle azioni di progetto, dei parametri di progetto e della geometria di progetto

$$(R = R \left[\gamma_F \cdot F_k, \frac{X_k}{\gamma_m}, a_d \right]).$$

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

Facendo riferimento a quanto previsto al p.to 3.5.2.3.8 del Doc Rif. [5], per le verifiche agli stati limite ultimi si adottano i valori dei coefficienti parziali in Tabella 1 (Tab. 5.2.V del Doc Rif. [3]) e i coefficienti di combinazione ψ in Tab. 5.2.VI.

		Coefficiente	EQU ¹	A1 STR	A2 GEO
Carichi permanenti	favorevoli	γ_{G1}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,10	1,35	1,00
Carichi permanenti non strutturali	favorevoli	γ_{G2}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Ballast	favorevoli	γ_B	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Carichi variabili da traffico	favorevoli	γ_Q	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,45	1,45	1,25
Carichi 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	1,00	1,00
Ritiro, viscosità e cedimenti non imposti appositamente	favorevole	γ_{ced}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevole		1,20	1,20	1,00

Tabella 1: Coefficienti parziali sulle azioni (Tab. 5.2.V del Doc. Rif.[3])

In Tabella 1 (Tab. 5.2.V del Doc. Rif. [3]) 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.

¹ Equilibrio che non coinvolga i parametri di deformabilità e resistenza del terreno; altrimenti si applicano i valori di GEO.

Azioni	Descrizione	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Azioni singole da traffico	Carico sul rilevato a tergo delle spalle	0,80	0,50	0,0
	Azioni aerodinamiche generate dal transito dei convogli	0,80	0,50	0,0
Gruppi di carico	gr1	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽³⁾	0,0
	gr2	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽³⁾	-
	gr3	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽³⁾	0,0
	gr4	1,00	1,00 ⁽³⁾	0,0
Azioni del vento	F_{wk}	0,60	0,50	0,0
Azioni da neve	in fase di esecuzione	0,80	0,0	0,0
	SLU e SLE	0,00	0,0	0,0
Azioni termiche	T_k	0,60	0,60	0,50

 Tabella 2: Coefficienti di combinazione ψ delle azioni (Tab. 5.2.VI del Doc. Rif.[3])

Azioni	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Treno di carico LM 71	0,80 ⁴	5	0,0
Treno di carico SW /0	0,80 ⁽⁴⁾	0,80	0,0
Treno di carico SW/2	0,00 ⁽⁴⁾	0,80	0,0
Treno scarico	1,00 ⁽⁴⁾	-	-
Centrifuga	(6) (4)	6	(6)
Azione laterale (serpeggio)	1,00 ⁽⁴⁾	0,80	0,0

 Tabella 3: Coefficienti di combinazione ψ delle azioni (Tab. 5.2.VII Doc. Rif.[3])

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 4: Coefficienti parziali sui terreni (M1 ed M2) - (Tab. 6.2.II, del Doc. Rif.[3])

² Quando come azione di base venga assunta quella del vento, i coefficienti ψ_0 relativi ai gruppi di carico delle azioni da traffico vanno assunti pari a 0,00.

³ 0,80 se è carico solo un binario, 0,60 se sono carichi due binari, e 0,40 se sono carichi tre o più binari.

⁴ Quando come azione di base venga assunta quella del vento, i coefficienti ψ_0 relativi ai gruppi di carico delle azioni da traffico vanno assunti pari a 0,00.

⁵ 0,80 se è carico solo un binario, 0,60 se sono carichi due binari e 0,40 se sono carichi tre o più binari.

⁶ Si usano gli stessi coefficienti ψ adottati per i carichi che provocano dette azioni

	PROGETTO DEFINITIVO RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO LOTTO 9 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA INTERVENTO					
	Relazione di calcolo stabilità rilevati esistenti	COMMESSA NB1R	LOTTO 09 D26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0004 001	REV. A

Coefficiente parziale	(R2)
γ_R	1.1

Tabella 5: Coefficienti parziali per le verifiche di stabilità globale (R2) - (Tab. 6.8.1, Doc. Rif. [3])

3.2.2 Stati limite di esercizio (SLE)

Deve essere verificato, mediante analisi effettuate impiegando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici dei materiali (Par. 6.5.3.2 del Doc. Rif. [3]), che gli spostamenti dell'opera in esame e del terreno circostante siano compatibili con la funzionalità della struttura e con la sicurezza e la funzionalità di manufatti adiacenti.

Nello specifico, come riportato nei Doc. Rif. [5] e [7], RFI stabilisce un valore soglia degli spostamenti residui attesi, corrispondenti ad uno Stato Limite di Esercizio (s_{SLE}), pari a 5 cm. Tale valore deve essere opportunamente confrontato con i valori calcolati al di sotto del rilevato.

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

3.3 Stabilità del sito nei confronti della liquefazione

In base a quanto indicato nelle NTC 2018 il sito presso il quale è ubicata l'opera deve essere stabile nei confronti della liquefazione. Se il terreno risulta suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti appaiono tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorre procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili di liquefazione.

Le NTC2018 al paragrafo 7.11.3.4.2 stabiliscono che la verifica alla liquefazione può essere omessa quando si manifesti una delle seguenti circostanze:

- Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di campo libero (cfr. a_{max}) minori di 0.1 g;
- Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;

- Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$, dove $(N1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche SPT, normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa, e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche CPT, normalizzata ad una tensione verticale efficace di 100 kPa;
- Distribuzione granulometrica esterna alle zone comprese tra le curve tipiche per materiali con coefficiente di uniformità $U_c < 3.5$ e coefficiente di uniformità $U_c > 3.5$.

In caso contrario risulta necessario valutare il rischio di liquefazione e i potenziali effetti in superficie mediante procedimento descritto nel Doc. Rif. [1], basato sui risultati di prove CPT e SPT.

3.4 Verifiche di sicurezza in campo sismico per opere in materiali sciolti

3.4.1 Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche

Le NTC 2018 (Doc. Rif. [3]) 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. [3]:

- **Stati Limite di Esercizio (SLE):**
 - Stato Limite di immediata Operatività **SLO**, per le strutture ed apparecchiature che debbono restare operative a seguito dell'evento sismico. Tale stato limite non si applica per l'opera in oggetto.
 - Stato Limite di Danno **SLD**, definito come lo stato limite da rispettare per garantire la sostanziale integrità dell'opera ed il suo immediato utilizzo.
- **Stati Limite Ultimi (SLU):**
 1. Stato Limite di Salvaguardia della Vita umana **SLV**, definito come lo stato limite in cui la struttura subisce una significativa perdita della 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.

2. Stato Limite di Prevenzione del Collasso **SLC**, stato limite nel quale la struttura subisce gravi danni strutturali, mantenendo comunque un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza a collasso per carichi orizzontali.

La Tabella 6 riporta, in funzione della classe d'uso della struttura, lo stato limite da considerare in funzione della verifica di sicurezza appropriata per l'opera (Tabella C7.3.I del Doc. Rif.[4]).

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

Tabella 6: Verifiche di sicurezza in funzione della Classe d'uso (Tab. C7.3.I, Doc. Rif.[4])

Con riferimento all'opera in oggetto, e considerando quanto riportato al punto C7.1 del Doc. Rif.[4], le verifiche geotecniche in presenza di un evento sismico richiedono la verifica ai seguenti stati limite:

- Stato Limite Ultimo: **SLV** – Stato Limite di Salvaguardia della Vita (cui corrisponde una probabilità di superamento $P_{vr} = 10\%$ nel periodo V_r);
- Stato Limite Esercizio: **SLD** – Stato Limite di Danno (cui corrisponde una probabilità di superamento $P_{vr} = 63\%$ nel periodo V_r).

Le suddette probabilità, valutate nel periodo di riferimento V_r per l'azione sismica, consentono di determinare, per ciascuno stato limite, il tempo di ritorno del terremoto di progetto corrispondente.

3.4.2 Stati limite ultimi (SLU)

Per tutte le verifiche l'azione sismica di progetto deve essere valutata sulla base degli Stati Limite relativi all'opera da verificare (vedasi Doc. Rif. [3]). Per l'opera in oggetto, le verifiche agli Stati Limite Ultimi verranno condotte con riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (**SLV**).

Le verifiche di sicurezza agli SLU in campo sismico devono contemplare almeno le medesime verifiche definite in campo statico. In particolare la stabilità globale in condizioni sismiche delle opere in materiali sciolti, quali rilevati, deve essere svolta ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a $\gamma_R = 1.2$. (vedasi Par.7.11.4 del Doc. Rif. [3]). 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. [3] le verifiche possono essere condotte mediante metodi pseudo statici, metodi degli spostamenti e metodi di analisi dinamica.

3.4.3 Stati limite di esercizio (SLE)

Deve essere verificato, mediante analisi effettuate impiegando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici dei materiali, che gli spostamenti permanenti indotti dal sisma non alterino significativamente la resistenza della fondazione e che siano compatibili con la funzionalità dell'opera.



PROGETTO DEFINITIVO
RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO
LOTTO 9
CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA INTERVENTO

Relazione di calcolo stabilità rilevati esistenti

COMMESSA NB1R	LOTTO 09 D26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0004 001	REV. A	FOGLIO 15 di 31
------------------	-----------------	----------------	-------------------------	-----------	--------------------

L'azione sismica di progetto deve essere valutata sulla base degli Stati Limite relativi all'opera da verificare come definito nelle istruzioni per l'applicazione delle NTC2018. Per l'opera in oggetto le verifiche agli Stati Limite di Esercizio verranno condotte con riferimento allo Stato Limite di Danno (**SLD**).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO LOTTO 9 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA INTERVENTO					
	Relazione di calcolo stabilità rilevati esistenti	COMMESSA NB1R	LOTTO 09 D26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0004 001	REV. A

4. AZIONE SISMICA DI PROGETTO E VALUTAZIONE NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE

4.1 Determinazione dell'azione sismica

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. [3]).

La descrizione di dettaglio della determinazione dell'azione sismica di riferimento per le verifiche geotecniche è riportata nella Relazione Geotecnica (Doc. Rif. [1]). Nel seguito si riprende tale descrizione nei contenuti e determinazioni principali.

In particolare l'azione sismica in base alla quale è stato verificato il rispetto dei diversi stati limite per le strutture in progetto è stata 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.

In particolare, nel caso in esame delle opere lungo la linea ferroviaria di PD, trattandosi di una opera infrastrutturale di elevata importanza, ma non inquadrata all'interno del sistema di grande viabilità ferroviaria, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto è stato assunto in sede progettuale (Doc. Rif. [1]):

$$V_N = 50 \text{ anni}$$

e appartenente alla Classe d'Uso II, alla quale le NTC2018 fanno corrispondere un coefficiente d'uso:

$$C_U = 1.0.$$

Pertanto la vita di riferimento dell'opera V_R risulta pari a 50 anni.

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.

Si è quindi proceduto alla definizione del tempo di ritorno T_R di riferimento per l'azione sismica, nel caso in esame corrispondente a 475 anni (per lo stato limite SLV con P_{vr} del 10%) sulla base della classificazione delle opere in progetto, e 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, sulla base delle informazioni disponibili, ai fini della microzonazione.

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 B**, il coefficiente S_s si ottiene dalla seguente espressione (vedi Tabella 3.2.IV del par. 3.2.3 delle NTC2018):

$$S_s = 1.0 \leq 1.40 - 0.4 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1.20$$

Per ciò che concerne l'amplificazione topografica, secondo quanto riportato nel Doc. Rif.[1], il tracciato corre all'interno di un sito sostanzialmente pianeggiante e viene classificato in categoria topografica T1 (Superficie pianeggiante e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$, v. Tabella 3.2.III al par.3.2.2. delle NTC2018). Pertanto, il fattore di amplificazione topografica risulta pari a:

$$S_T = 1$$

Il fattore di sito S e l'azione sismica di progetto $a_{max} = S \cdot a_g$ ottenuti per i diversi periodi di ritorno in corrispondenza dello stato limite di Salvaguardia della Vita (SLV), sono:

Tabella 7-Parametri per la valutazione dell'azione sismica

Nome di sito	SL	T_R (anni)	a_g (g)	S (-)	a_{max} (g)
Tratto A1 (Da Prog. 00+000 km a Prog. 4+000 km del tratto Bergamo – Ponte San Pietro)	SLV	475	0.114	1.2	0.137

A partire dai valori sopra riportati, scegliendo il valore massimo di a_{max} , risulta:

$$a_{max} [g] = S a_g [g] = 0.199 \times 1.20 \times 1.0 = 0.137$$

4.2 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.

4.2.1.1 Coefficienti sismici per la verifica di stabilità globale

Come descritto al Par. C7.11.4 del Doc. Rif. [4], la verifica di stabilità globale va condotta mediante il metodo di analisi definito al Par. 7.11.3.5 del Doc. Rif.[3], inerente alla stabilità dei pendii.

Sulla base di quanto definito al Par.7.11.3.5.2 del Doc. Rif.[3], in mancanza di studi specifici, i coefficienti sismici k_h (orizzontale) e k_v (verticale) sono definiti come:

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

$$k_v = \pm k_h / 2$$

essendo

β_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

Come chiarito al Par. 7.11.4 del Doc. Rif. [3] il valore del coefficiente β_s da assumere è pari a 0.38 per verifiche allo SLV su fronti di scavo o rilevati, come nel caso in oggetto.

Nel caso specifico tutte le sezioni indagate ricadono nella parte di tracciato con categoria stratigrafica B pertanto il valore di a_{max} considerato è unico e pari a 0.137g.

In accordo alle espressioni di cui sopra, si ottengono i seguenti coefficienti per la verifica di stabilità globale allo SLV (Tabella 8):

Tabella 8: Valori dei coefficienti sismici per le verifiche di stabilità globale

STATO LIMITE	T_R	k_h	k_v
	[anni]	[g]	[g]
SLV	475	0.052	± 0.026

4.3 Sintesi delle verifiche a liquefazione

Al fine di definire se nella tratta oggetto della presente relazione vi siano zone potenzialmente instabili nei confronti della liquefazione, sono state condotte una serie di verifiche, per la cui descrizione di dettaglio si rimanda alla Relazione Geotecnica (Doc. Rif.[1]).

In base agli esiti di tali verifiche si può escludere il rischio di liquefazione nella tratta in esame, pertanto le verifiche di sicurezza descritte nel seguito sono state eseguite escludendo dai calcoli il fenomeno della liquefazione.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO LOTTO 9 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA INTERVENTO					
	Relazione di calcolo stabilità rilevati esistenti	COMMESSA NB1R	LOTTO 09 D26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0004 001	REV. A

5. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA

5.1 Codici di calcolo utilizzati

5.1.1 Slope/W

Slope/W è un codice di calcolo dedicato allo studio della stabilità dei pendii che permette di calcolare il fattore di sicurezza dei pendii in terreno e in roccia.

Il codice Slope/W utilizza il metodo dell'equilibrio limite e permette di prendere in considerazione superfici di scorrimento definite in diversi modi, condizioni stratigrafiche e idrostratigrafiche complesse mediante l'utilizzo di diversi modelli costitutivi per i materiali e condizioni di pressioni neutre variabili. Sono inoltre utilizzabili diversi metodi di analisi e possono essere applicate condizioni di carico di vario tipo.

La versione del software adottata per le verifiche condotte nel presente documento è SLOPE/W – GeoSLOPE ver. 7.17 - GEOSTUDIO 2007.

5.2 Metodologie di verifica adottate

5.2.1 Verifiche di stabilità

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

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

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

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

Per le analisi in condizioni sismiche è stata adottata l'azione definita al precedente punto 4.



PROGETTO DEFINITIVO
RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO
LOTTO 9
CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA INTERVENTO

Relazione di calcolo stabilità rilevati esistenti

COMMESSA NB1R	LOTTO 09 D26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0004 001	REV. A	FOGLIO 21 di 31
------------------	-----------------	----------------	-------------------------	-----------	--------------------

Nelle analisi sono state escluse, perché considerate non significative, le superfici di rottura superficiali che coinvolgono volumi di terreno ridotti. A tal proposito si sottolinea che nei calcoli, a favore di sicurezza, non è stato preso in conto in alcun modo l'effetto che la finitura a verde delle scarpate darà necessariamente, in termini di coesione efficace, allo strato più superficiale delle scarpate, né il pacchetto di pavimentazione stradale ferroviaria che contribuisce anch'esso ad incrementare la resistenza allo scivolamento nella porzione di meccanismo che attraversa tali materiali. Sempre a favore di sicurezza, inoltre, non è stata considerata la presenza a progetto di barriere antirumore e/o muri di recinzione, le cui fondazioni profonde forniscono un ulteriore contributo alla stabilità dei rilevati oggetto di verifica.

6. CARATTERISTICHE DEL CORPO STRADALE FERROVIARIO

6.1 Descrizione della sezione di verifica

Per quanto riguarda la geometria dei rilevati, si è fatto riferimento agli elaborati di progetto ad essi relativi ed in particolare alle sezioni trasversali, tipologiche e correnti.

La sezione che risulta più significativa ai fini della verifica è la **sezione S2**, rappresentata nei documenti progettuali NB1R09D26P7CS0000001 e NB1R09D26W9CS0000001A.

Si riporta di seguito uno stralcio della planimetria di progetto NB1R09D26P7CS0000001, con identificazione della sezione sottoposta a verifica:

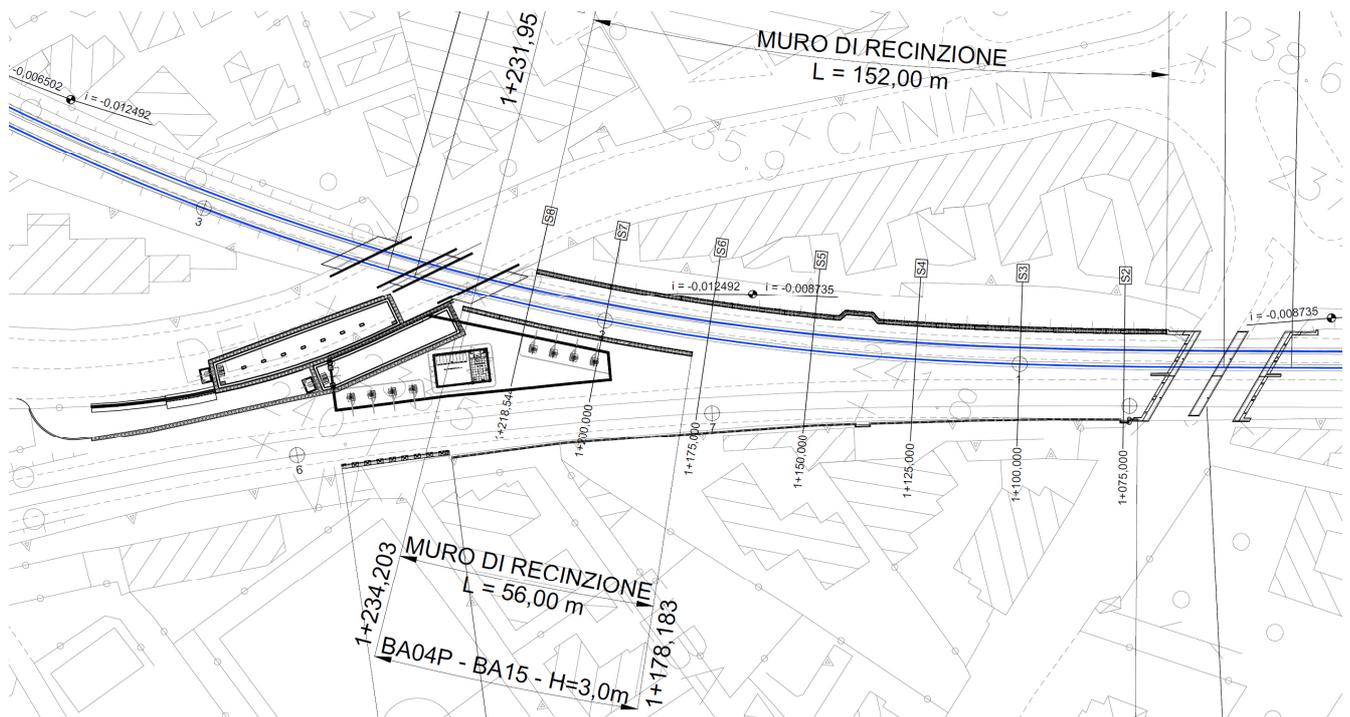


Figura 1: Stralcio della planimetria di progetto con identificazione della sezione S2

La sezione S2, ubicata alla pk 1+075 del binario pari di progetto della linea Ponte S.Pietro – Bergamo, è caratterizzata da un limitato riposizionamento dell'attuale singolo binario esistente,

	PROGETTO DEFINITIVO RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO LOTTO 9 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA INTERVENTO					
	Relazione di calcolo stabilità rilevati esistenti	COMMESSA NB1R	LOTTO 09 D26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0004 001	REV. A

che è collocato al margine nord del rilevato; il nuovo binario di raddoppio sarà posato a sud di esso, a 4 m di interasse, nell'intervista verso la linea Treviglio-Bergamo.

La larghezza della massicciata disponibile è adeguata ad accogliere la linea Ponte S.Pietro – Bergamo in configurazione raddoppiata, pertanto la geometria del rilevato esistente sarà conservata ed è prevista solo la formazione di un nuovo strato di supercompattato, spesso 30 cm, sotto l'armamento dei due binari, in sostituzione di quello esistente.

La sezione è caratterizzata da un'altezza del rilevato di circa 5.6 m; lato nord la scarpata, di pendenza di poco inferiore a 3:2, è chiusa da un muro di sottoscarpa alto circa 2 m, mentre a sud, oltre i due binari esistenti della linea Treviglio-Bergamo, il rilevato è sostenuto da un muro per tutta la sua altezza.

6.2 Materiali costituenti il rilevato e la sede ferroviaria

Per quanto riguarda il materiale costituente il corpo del rilevato esistente, si sono assunte le seguenti caratteristiche minime: peso specifico pari a 20 kN/m³, angolo di attrito caratteristico ϕ'_k pari a 38° e coesione efficace nulla.

6.3 Carichi di progetto

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

- Carico rappresentativo del pacchetto di armamento ferroviario (ballast, traversine, rotaie).
- Sovraccarico rappresentativo del traffico ferroviario.
- Carico da azione sismica.

L'armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14.4 kPa, rappresentativo di uno strato di spessore pari a circa 0.80 m con un peso pari a 18.00 kN/m³. Il carico è stato applicato sulla sommità del rilevato per una larghezza complessiva di circa 10 m, laddove l'armamento non è effettivamente presente.

Per la definizione del sovraccarico da traffico ferroviario si sono valutate le pressioni equivalenti dovute al carico assiale D4.

La pressione considerata è stata assunta pertanto pari a 41.67 kPa.



PROGETTO DEFINITIVO
RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO
LOTTO 9
CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA INTERVENTO

Relazione di calcolo stabilità rilevati esistenti

COMMESSA NB1R	LOTTO 09 D26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0004 001	REV. A	FOGLIO 24 di 31
------------------	-----------------	----------------	-------------------------	-----------	--------------------

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

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

7. RISULTATI DELLA SEZIONE DI VERIFICA

7.1 Stratigrafia e parametri geotecnici di calcolo

In accordo a quanto riportato nella Relazione Geotecnica (Doc. Rif.[1]) e sulla base di quanto descritto nel Cap. 3, nella Tabella 9 e Tabella 10 sono riportati la stratigrafia definita a partire da base rilevato, al di sotto del pacchetto di armamento ferroviario, ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto, fattorizzati utilizzando i coefficienti M2 contenuti nella Tabella 4 della presente relazione.

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

Tabella 9: Stratigrafia di calcolo per la sezione S2

Strato	Profondità media	Profondità media	Descrizione	
	Da [m da p.c.]	A [m da p.c.]		
Ug1	0	6	S(G), S,G	Sabbia ghiaiosa e sabbia con ghiaia
Ug3b	6	16	A(S), A,S	Argilla sabbiosa e argilla con sabbia
Ug4	16	-	S(G), S,G	Sabbia ghiaiosa e sabbia con ghiaia

Tabella 10: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione S2 – Materiali in situ

Strato	Parametri di resistenza					Parametri di deformabilità					
	γ_n	K_0	φ'	c'	c_u	G_0	E_0	E_{op1}	E_{op2}	ν'	k_v (*)
	[kN/m ³]	[-]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[m/s]
Ug1	20	0.42	35	0	-	50 - 120	125 - 300	10 - 30	15 - 40	0.25	1.00E-06
Ug3b	19	0.60	24	0	50 - 100	75 - 150	180 - 375	15 - 30	25 - 50	0.25	1.00E-10
Ug4	20	0.38	38	0	-	220 - 250	550 - 625	60 -80	80 - 100	0.25	1.00E-06

Note:

- Gli intervalli, dove presenti, fanno riferimento a valori crescenti con la profondità.
- (*) per analisi di cedimento adottare cautelativamente i parametri di permeabilità verticale definiti in tabella; per analisi di stabilità adottare anche i parametri di permeabilità orizzontale $k_h = 10 k_v$ per tutti i materiali tranne Ug1 per cui adottare $k_h = k_v$.
- I moduli E_{op1} ed E_{op2} sono da adottarsi rispettivamente E_{op1} per problemi di "primo carico" (esempio fondazioni dirette, profonde e rilevati) ed E_{op2} per problemi di scarico e/o di scarico-ricarico (esempio: fronti di scavo sostenuti con opere di sostegno tipo paratie tirantate e non).

	PROGETTO DEFINITIVO RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO LOTTO 9 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA INTERVENTO					
	Relazione di calcolo stabilità rilevati esistenti	COMMESSA NB1R	LOTTO 09 D26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0004 001	REV. A

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli ad una profondità media di 27 metri da p.c..

7.2 Verifiche SLU – Stabilità globale

Le verifiche SLU della stabilità globale del rilevato (sia in condizioni statiche che sismiche) sono state condotte tramite il codice di calcolo Slope/W (Doc. Rif. [12]). Le combinazioni di carico adottate nelle analisi fanno riferimento rispettivamente ai coefficienti parziali (A2+M2) per le analisi in campo statico e ai valori caratteristici per le analisi sismiche. Tali coefficienti sono contenuti nella Tabella 1 e nella Tabella 4 della presente relazione.

Come da NTC 2018 (Doc. Rif. [3]), la verifica SLU di stabilità globale è soddisfatta se la relazione:

$$FS \geq R2 = 1.1$$

è verificata in condizioni statiche e la relazione:

$$FS \geq R2 = 1.2$$

è verificata in condizioni sismiche.

Il coefficiente R2 è contenuto nella Tabella 5 della presente relazione.

7.2.1 Verifiche SLU in condizioni statiche

L'analisi di stabilità globale in campo statico del rilevato con altezza pari a circa 5.6 m è stata condotta in accordo alla combinazione DA1C2 assumendo i parametri geotecnici di cui in Tabella 10 per i materiali in sito.

Il carico da traffico ferroviario (q) per treno D4, assunto pari a 41.67 kPa, è stato modellato come un carico distribuito applicato in corrispondenza delle impronte delle traversine ferroviarie. Tale sovraccarico è di tipo variabile/sfavorevole pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 1; il valore di calcolo è stato assunto pari a:

$$q_d = q_k \times \gamma_{Qi [A2]} = 41.67 \text{ kPa} \times 1.3 = 54.17 \text{ kPa}.$$

L'armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14.4 kPa, rappresentativo di uno strato di spessore pari a circa 0.80 m con un

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO RADDOPPIO PONTE SAN PIETRO – BERGAMO – MONTELLO LOTTO 9 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA INTERVENTO					
	Relazione di calcolo stabilità rilevati esistenti	COMMESSA NB1R	LOTTO 09 D26	CODIFICA CL	DOCUMENTO RI0004 001	REV. A

peso pari a 18.00 kN/m³. Tale carico è di tipo permanente sfavorevole, pertanto in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 1; il valore di calcolo è stato assunto pari a: $q_d = q_k \times \gamma_{Gi [A2]} = 14.4 \text{ kPa} \times 1.3 = 18.72 \text{ kPa}$.

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

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

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

$$FS^{MIN} (DA1C2) = 1.358$$

Essendo soddisfatta la relazione:

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

la verifica di stabilità globale in campo statico risulta soddisfatta.

7.2.2 Verifiche SLU in condizioni sismiche

L'analisi di stabilità globale in campo sismico del rilevato tipologico con altezza pari a 5.6 m alla sezione S2 è stata condotta assumendo i parametri geotecnici caratteristici di cui in Tabella 10 per i materiali in sito.

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

$$K_H = + 0.052 \text{ (concorde alla direzione di scivolamento)}$$

$$K_V = \pm 0.026 \text{ (verificando la più cautelativa tra negativo e positivo)}$$

Il carico ferroviario (q), assunto pari a 41.67 kPa, è stato moltiplicato per un coefficiente $\psi = 0.2$ in accordo a Doc. Rif. [3] e modellato come un carico distribuito applicato in corrispondenza delle impronte delle traversine ferroviarie. Tale sovraccarico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico in accordo a quanto specificato dalle NTC 2018 (vedasi Par.7.11.1 del Doc. Rif. [3]),

che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:

$$q_d = 0.2q_k = 8.33 \text{ kPa.}$$

L'armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14.4 kPa, rappresentativo di uno strato di spessore pari a circa 0.80 m con un peso pari a 18.00 kN/m³. Tale carico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico in accordo a quanto specificato dalle NTC 2018 (vedasi Par.7.11.1 del Doc. Rif. [3]), che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:

$$q_d = q_k = 14.4 \text{ kPa.}$$

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

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

In Figura 3 e Figura 4 è riportata la superficie di rottura critica; il fattore di sicurezza FS relativo a tale meccanismo, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS^{MIN} = 1.528$$

Essendo soddisfatta la relazione:

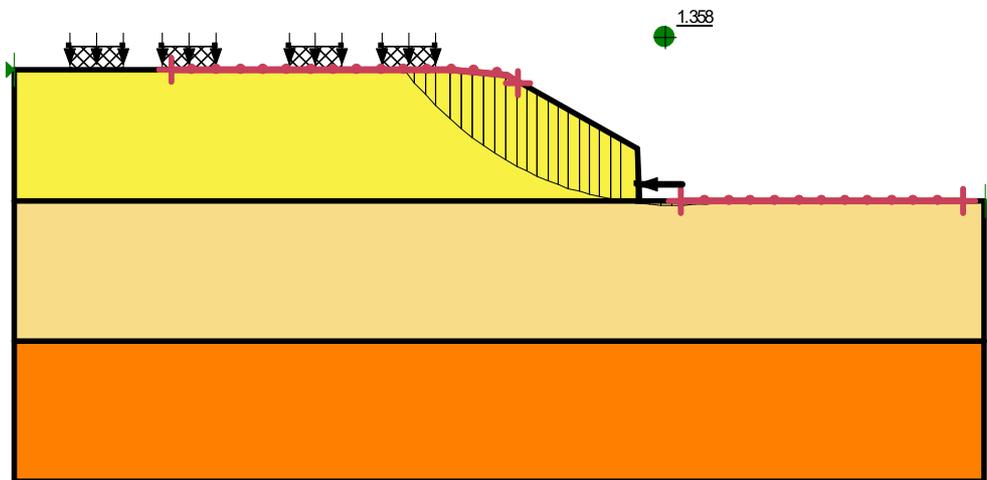
$$FS^{MIN} \geq R2 = 1.2,$$

la verifica di stabilità globale in campo sismico risulta soddisfatta

RILEVATO TRENO D4
SEZIONE S2

STATICA

sovraccarico $41.67 \cdot 1.3 + 14.4 \cdot 1.3 = 72.9 \text{ kPa}$



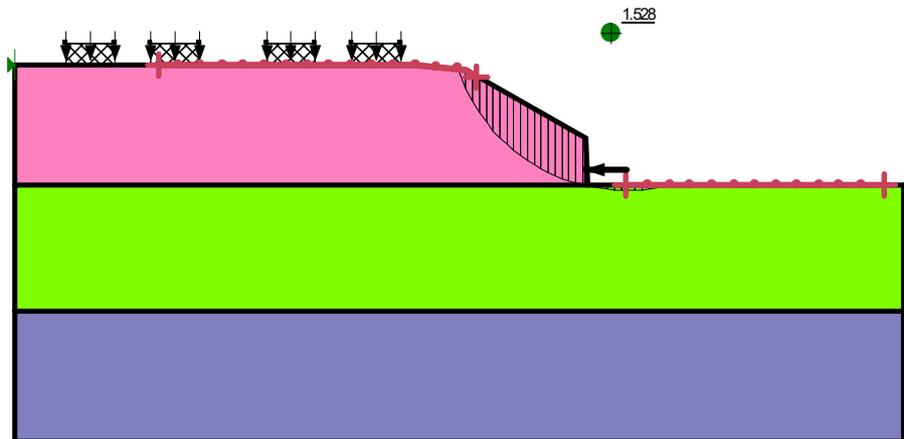
Name: Rilevato M2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 32 °
 Name: UG1 M2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 20 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 29.26 °
 Name: UG3B M2 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 20 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 19.61 °

Figura 2: Rilevato H=5.6 m, sez. S2- Analisi di stabilità globale in campo statico DA1

RILEVATO TRENO D4
SEZIONE S2

SISMICA
KH = 0.052
KV = +0.026

sovraccarico $41.67 \cdot 0.2 + 14.4 = 22.7 \text{ kPa}$



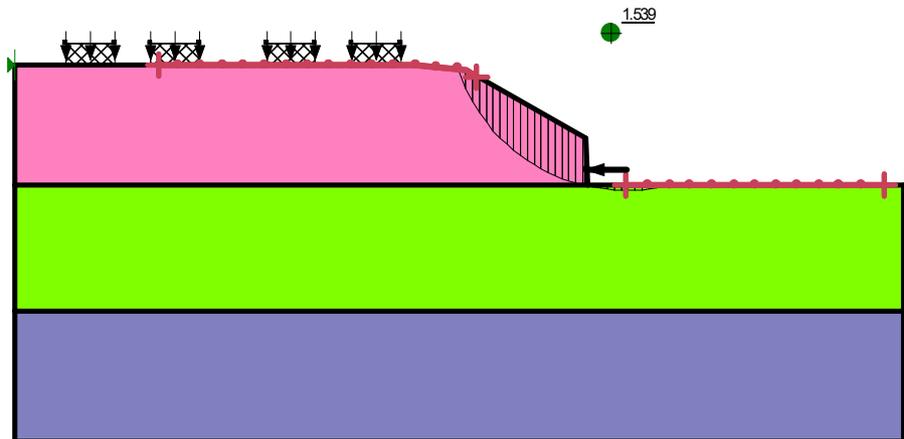
Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 38 °
 Name: UG1 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 20 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 35 °
 Name: UG3B Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 20 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 24 °

Figura 3: Rilevato H=5.6 m, sez. S2 - Analisi di stabilità globale in campo sismico (+)

RILEVATO TRENO D4
SEZIONE S2

SISMICA
KH = 0.052
KV = -0.026

sovraccarico $41.67 \cdot 0.2 + 14.4 = 22.7 \text{ kPa}$



Name: Rilevato Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 19 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 38 °
Name: UG1 Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 20 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 35 °
Name: UG3B Model: Mohr-Coulomb Unit Weight: 20 kN/m³ Cohesion: 0 kPa Phi: 24 °

Figura 4: Rilevato H=5.6 m, sez. S2 - Analisi di stabilità globale in campo sismico (-)